

北野 保行 学校法人仁多学園

優しい物理学 [第2版完] 物理学を習ったことのない人のための物理学

優しい物理学

第2版完

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 第2版完

物理学を習ったことのない人のための物理学

発行 2022年5月1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 2022 Printed in Japan

ISBN番号978-4-9910860-1-4

定価 (本体3,500円+税)

優しい物理学

第2版完

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

web :

<https://ir.lib.shimane-u.ac.jp/54382>

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、その感動は今でも忘れられ
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

質量がなくな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るのです
高い空の温度は何度でしょう
風はどのようにして吹くのでしょうか

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か
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か
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

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。表紙にメー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、物理学の講義時間が倍になればよいのですがね。

最後に、理学療法士・作業療法士の国家試験問題の解説とコメントを作りました。もちろん物理学関連の問題だけです。国家試験の前に、ちょっと目を通してください。問題に慣れることが大切です。

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。

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ました

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

2017年4月16日

目次

まえがき	
第 I 章 自然の法則と SI 国際単位系	1 1
第 I 章のまえがき	1 1
1. 黄道 12 星座	1 2
2. 万有引力の法則	1 7
3. 重力(重さ)と質量	1 8
4. 質量の単位と力の単位	1 9
5. 力から派生する物理量の単位 I 圧力	1 9
6. 力から派生する物理量の単位 II エネルギー	2 1
7. 気体の状態方程式と気体定数 R	2 2
8. 重力加速度 $g = 9.8 \text{ ms}^{-2}$ の計算準備	2 3
9. 重力加速度 $g = 9.8 \text{ ms}^{-2}$ の計算	2 4
10. 長さの単位 [メートル m] の起源	2 5
11. 時間の単位 [秒 s] の起源	2 6
12. 質量の測り方	2 7
13. 単位についてのまとめ	2 8
第 I 章 練習問題	3 1
第 II 章 ニュートンの運動の法則	3 3
第 II 章のまえがき	3 3
1. 止まっている物体の物理学 —釣り合いの力学—	3 4
2. 仕事と仮想仕事の原理	3 7
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	3 8
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	3 9
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	4 1
6. 物体の動き方と質量の関係	4 3
7. ニュートンの運動の第 2 法則	4 3

8. ベクトル	4 4
9. 位置、速度	4 4
10. 加速度	4 5
11. 曲がる時の加速度	4 7
12. 運動の法則と微分積分学	4 9
13. ニュートンの三大偉業	5 0
14. 自然の記述	5 1
15. 力の単位	5 2
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	5 2
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	5 4
18. ニュートンの運動の第 1 法則 —ガリレオの慣性の法則—	5 5
19. ニュートンの運動の第 3 法則 —作用反作用の法則—	5 6
20. 日本の若者の理科離れをなくすために	5 8
第 II 章 練習問題	5 9
第 III 章 原子と原子核	6 3
第 III 章のまえがき	6 3
1. 原子の構造	6 4
2. 原子核の構造	6 5
3. 安定な原子核を持つ安定同位元素	6 7
4. 原子の質量	6 7
5. 原子量	7 6
6. 質量欠損	7 8
7. 質量と質量原器	7 8
8. 質量のはかり方	7 9
9. 質量に関する特殊相対性理論の結論	8 0
10. 莫大な原子核エネルギーの源	8 1
11. 原子核の結合エネルギーと質量欠損	8 3
12. 原子の質量欠損をグラフにする	8 4
13. 元素が変化する反応：核反応	8 5
14. 不安定原子核を持つ放射性同位体	8 5
15. 不安定原子核の崩壊	8 9
16. 放射線と放射線吸収線量 D およびその単位グレイ [$\text{Gy} = \text{Jkg}^{-1}$]	8 9
17. 放射能とその単位ベクレル [$\text{Bq} = \text{s}^{-1}$]	9 0
18. 原子核崩壊の半減期	9 2

19. 原子核反応：①核分裂 ②核崩壊 ③核融合	94
20. 核分裂と不安定な放射性原子核の製造	96
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	98
22. 核分裂によって放出されるエネルギーの計算	100
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	103
24. 天然に存在する放射性物質	105
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 [$\text{Sv} = \text{Jkg}^{-1}$]	108
第 III 章 練習問題	112
第 IV 章 われわれを取り巻くもの	115
第 IV 章のまえがき	115
第 IV 章 A. 大気	117
A 1. 地球大気の垂直構造	117
A 2. 均質圏と非均質圏	119
A 3. 対流圏	119
A 4. 成層圏	122
A 5. 気体の一般的性質 – ボイル・シャルルの法則	
理想気体の状態方程式 –	123
A 6. 断熱変化	125
A 7. 熱による物質の状態変化とエネルギー保存則	127
A 8. 空気中の水蒸気	128
A 9. 気象現象	130
A 10. 上昇気流による温度の低下とフェーン現象	131
A 11. 冬、西高東低で北風が吹く	133
A 12. 台風	134
A. 練習問題	136
第 IV 章 B. 水	139
B 1. 水はわれわれの目の前で	
姿を変える(物質の三態)	139

B 2. 水の密度 氷の密度	141
B 3. Water はものをよく溶かす	142
B 4. H_2O の沸点・融点の異常	144
B 5. 熱容量	145
B 6. 潜熱	147
B 7. H_2O の熱容量と潜熱	148
B 8. H_2O 分子の形	150
B 9. 水素結合	152
B 10. Ice の結晶構造	154
B. 練習問題	155

第 IV 章 C. 熱と温度 157

C 1. 熱とは何か	157
C 2. エネルギーの単位	157
C 3. キログラム熱容量・モル熱容量	158
C 4. 温度	158
C 5. 物質の移動による熱エネルギーの移動・対流	159
C 6. 熱の伝導による熱エネルギーの移動・熱伝導	160
C 7. 光によるエネルギーの移動・放射	163
C. 練習問題	164

第 IV 章 D. 波・音・光 167

D 1. 波とはなにか	167
D 2. 音波 粗密波 縦波 波長 振動数 音速	169
D 3. 音の三要素 高さ・大きさ・音色	171
D 4. 液体中の音波 固体中の音波 超音波診断	171
D 5. 十二平均律音階と自然(純正)律音階	172
D 6. 光の波 波長・周波数・光速	174
D 7. 光の透過・反射・屈折・全反射	175
D 8. 虹	177
D 9. CD 分光器によるスペクトル観察	179
D 10. ドプラー効果	180
D. 練習問題	186

第 IV 章 E. 電気・磁気そして電磁波	189
E 1. 電気の素	189
E 2. 電気量・電流・電圧・電力 ・電気抵抗・ジュール熱	190
E 3. 磁石	193
E 4. 電場(電界)	194
E 5. 磁場(磁界)	195
E 6. 電磁気学の4つの基本法則	199
E 7. 光の本質の発見	201
E 8. 電磁波	203
E. 練習問題	205

第 IV 章 F. 太陽の温度・地球の温度	209
F 1. プランクの光の放射の法則	209
F 2. シュテファン・ボルツマンの法則と ウィーンの変位則	213
F 3. 太陽光スペクトルの大気圏外での観測	214
F 4. 太陽表面温度と地球に届く太陽放射エネルギー	215
F 5. 地球がもらう放射エネルギーと裸の地球の温度	218
F 6. 地球表面はすでに水蒸気によって温暖化している	219
F 7. 成層圏の温度降下	220
F 8. 現在の地球表面の温暖化の証拠は何処に現れるか	221
F. 練習問題	225

第 V 章 物理学実験のテーマと解説

第 V 章のまえがき

実験 1 サイフォンでコーヒーを — 物理学の目的は —	228
実験 2 水圧を目で見る — 水の深さと水圧の関係 —	230
実験 3 水の中で体が軽い — 浮力とアルキメデスの原理 —	231
実験 4 空気に重さがある — トリチェリの真空 —	232
実験 5 血圧測定 — 圧力の測定 —	234
実験 6 てこの原理 — 便利な道具の物理学 —	235
実験 7 おもちゃの物理学 — 伝統的な子供の遊び —	236
実験 8 車いすの押し方 — 交通安全を目指して —	237

実験 9 雲を作る — 断熱膨張 —	238
実験 10 湿度の測り方 — 毎日定時測定 —	238
実験 11 おんさ 共鳴箱 — うなり —	239
実験 12 物質物理学入門 — 新素材実験セット —	239
実験 13 水による光の屈折 — 水中の光速は遅くなる —	240
実験 14 虹の見え方 — 虹は七色 —	241
実験 15 CD 分光器 — 色がキラキラ —	242
実験 16 電気の素 — 箔検電器 —	243
実験 17 磁石と磁場 — 方位磁石による磁場分布測定 —	244
実験 18 電流の周りの磁場 — 電流は磁場を作る —	244
実験 19 発電 — 現代文明の根幹 —	245
実験 20 光の偏光 — 立体メガネ —	245
第 V 章 練習問題	246

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

第 VI 章のまえがき

第 47 回 2012 年度	248
第 48 回 2013 年度	250
第 49 回 2014 年度	256
第 50 回 2015 年度	259
第 51 回 2016 年度	261
第 52 回 2017 年度	264

あとがき

執筆にあたって参照した文献

事項索引

人名索引

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。

長さの単位を例にとると、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。

単位の話を知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。物体は見えぬ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。これらを例にと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、看護師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。あらゆるものが古いのですが、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。

この教科書では **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か。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ますと考えます。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ました、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るとされています。

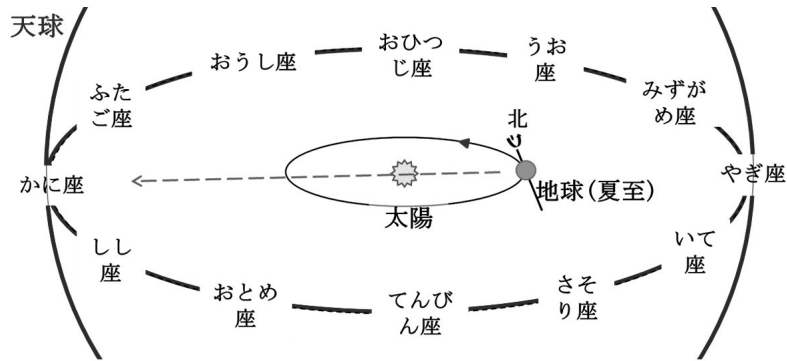


図 I-1 黄道 12 星座・太陽・地球と地軸の傾き

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ます。

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ではありません

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。

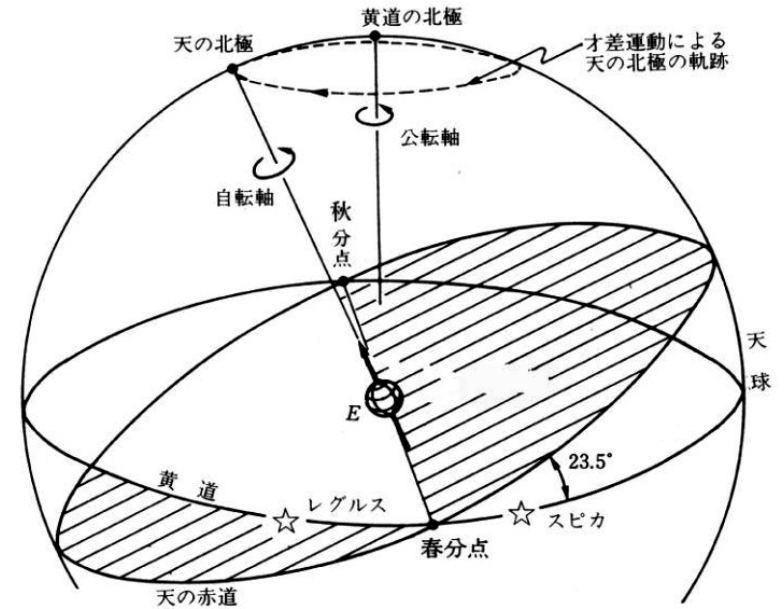


図 I-2. 地球を中心とした天球の図
春分点 黄道面(公転面) 天の赤道面 自転軸 歳差運動による地軸変化
(藤原邦男著 物理学序論としての力学 東京大学出版会 1984 年 9 月 28 日)

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 丸善)。

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)		β(さそり座)		レグルス(しし座)	
			赤経(度)	赤緯(度)	赤経(度)	赤緯(度)	赤経(度)	赤緯(度)
チモカリス	BC293	166	172.5	1.4	212.0	1.3	21.3	
ヒッパルコス	BC127		174.3	0.6			119.8	20.7
メネラウス	AD98	40	176.3		215.9			
プトレマイオス	AD138		176.5	0.5	216.3	122.5		19.8
アル・バッターニ	AD1529	1391			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 1 2 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が。

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 1 2 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が、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が変わっているはずですが。

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、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、

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

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となります。

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。

「リンゴは落ちるが、月は落ちてこない」これはなぜか、という疑問が出发点です。そしてニュートンは、月が地球を回ることと、リンゴが落ちることは、「同じ万有引力に拠るのだ」との考えに到達しました。

ニュートンがその発見者として、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で、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。

その答が数学的で定量的であることが理想的です。特別な場合に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2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。

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

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

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

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。

これらの単位の使用は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。

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

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。

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 ms^{-2} です。

式に書くと、質量 m [kg] の人の重力は

$$\begin{aligned} \text{重力} &= mg = 9.8m \text{ [N]} & \text{(I-4)} \\ &= 70 \times 9.8 = 686 \text{ N} \end{aligned}$$

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ひましょう。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 $\times 9.8$ [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 平方メートル 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す。

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 $\times 100$ の意味です。キロの k が $\times 1000$ 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 $101300 \text{ Pa} = 1013 \text{ hPa}$ 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エリーの頭文字です。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 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 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。

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

質量 = 体積 \times 密度より、水銀の質量 M_{Hg} は

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

水銀の重力 = 水銀の質量 \times 重力加速度

$$\begin{aligned} W_{\text{Hg}} &= M_{\text{Hg}} \cdot 9.8 \\ &= V_{\text{Hg}} \cdot 13.6 \cdot 10^3 \cdot 9.8 \\ &= 1 \cdot 1 \cdot 0.76 \cdot 13.6 \cdot 10^3 \cdot 9.8 \\ &= 101300 \text{ N} \end{aligned}$$

従って、1 気圧 atom を単位 Pa で表すと

$$\begin{aligned} 1 \text{ atom} &= \text{力 [N]} / \text{面積 [m}^2\text{]} \\ &= 101300 \text{ N} / 1 \text{ m}^2 \\ &= 101300 \text{ Pa} = 1013 \text{ hPa} \end{aligned}$$

この圧力は 760 Torr です。まとめると、

$$760 \text{ Torr} = 1013 \text{ hPa} = 1 \text{ atom} \quad \text{(I-5)}$$

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、医者や看護師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か。計算しておきましょう。

$$\begin{aligned} 150 \text{ Torr} &= 150 \cdot \frac{1013}{760} = 150 \cdot 1.333 \\ &= 200 \text{ hPa} = 20 \text{ kPa} \end{aligned}$$

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、

力 [N] で、長さ [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。

ある時間の間に生じた全エネルギーを、それを生ずるのに要した時間 [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 [J s⁻¹] で、日常よく使う [ワット W] です。この [W] = [J s⁻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 [J s⁻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]、電流量 [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°C 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エ (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。この値は熱の仕事当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。

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、熱の仕事当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。

大気中で、水 1 kg の温度を 1°C (絶対温度でも 1K、基準を 0°C = 273 K とした目盛) 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

表 I-2 キロカロリー [kcal] とキロジュール [kJ] の換算

温度	0 °C	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
0 °C+	4.2174	4.1919	4.1816	4.1782	4.1783	4.1804	4.1841	4.1893	4.1961	4.2048
1 °C+	4.2138	4.1904	4.1810	4.1781	4.1784	4.1807	4.1846	4.1899	4.1969	4.2058
2 °C+	4.2104	4.1890	4.1805	4.1780	4.1786	4.1811	4.1850	4.1905	4.1977	4.2068
3 °C+	4.2074	4.1877	4.1801	4.1780	4.1788	4.1814	4.1855	4.1912	4.1985	4.2078
4 °C+	4.2045	4.1866	4.1797	4.1779	4.1789	4.1817	4.1860	4.1918	4.1994	4.2089
5 °C+	4.2019	4.1855	4.1793	4.1779	4.1792	4.1821	4.1865	4.1925	4.2002	4.2100
6 °C+	4.1996	4.1846	4.1790	4.1780	4.1794	4.1825	4.1871	4.1932	4.2011	4.2111
7 °C+	4.1974	4.1837	4.1787	4.1780	4.1796	4.1829	4.1876	4.1939	4.2020	4.2122
8 °C+	4.1954	4.1829	4.1785	4.1781	4.1799	4.1833	4.1882	4.1946	4.2029	4.2133
9 °C+	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°C (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ルティーと、まる覚えしてください。この式の中のアル R について考えましょう。式を書きましょう。

$$PV = nRT \quad (I-6)$$

ここで、P は気体の圧力、V はその体積、n はモル数 (同一物質の量) [mol] (1 mol は 6.02・10²³ 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°C = 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 m³ 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°C) の時、1 mol の気体の体積は、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、リットルキアツ毎モル毎ケ- $[\ell \cdot \text{atom} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$ 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 $[\text{m}^3]$ 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。

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

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 の値はデータベースによります (国立天文台編 理科年表)。

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

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。

$$r = \frac{6378137 + 6356752}{2} \\ = 6367 \text{ km} \quad (\text{I-1})$$

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**地球メタポ**であり、地球の自転軸の変化につながっています。何ごともおそろかにすることはできないことも事実です。

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。

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

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

に、①万有引力定数

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

②地球の質量

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

③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。

$$F = \frac{6.673 \times 5.974 \times 10^{13}}{6.367 \times 6.367 \times 10^{12}} \text{ m} \\ = 9.8m \text{ [N]} \quad (\text{I-4})$$

値 9.8 が。出てきました。私の質量だけ m [kg] のまま残しておきます。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ります。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

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か。

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、三角測量法を使って精密に

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
(国立天文台編 理科年表 2003)

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

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**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 メートルの長さとは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。式中の「 \cdot 」は「 \times 」の意味で使います。

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せん。

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 で割り切れず。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。

I-1 2. 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、 $70 \times 9.8 = 686 \text{ N}$ 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づらくなります。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。

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**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。

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のようにするでしょう。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してみよう。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-1 3. 単位についてのまとめ

単位についてまとめておきます。ここまでは、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 つを組み合わせることができます。このようにして、組み合わせることが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 **ケルビン** [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だし、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ぬ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勞をしたものです。

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。

2019 年に、SI 国際単位系の基本単位について改定が行われました。その部分を追加して示しました。

表 I-4-a. SI 国際単位系の 7 つの SI 基本単位

物理量	単位記号	読み方	従来の基準	2019 年 5 月以降の基準
位置、距離、長さ	m	メートル	真空中の光速	同左
質量	kg	キログラム	キログラム原器	プランク定数 h
時間	s	秒	Cs 原子に共鳴する周期	同左
電流	A	アンペア	二本の導体間に働く力	電気素量 e
絶対温度	K	ケルビン	水の三重点	ボルツマン定数 k
光の明るさ光度	cd	カンデラ	540THz の光に対する視覚効率	同左
同一物質の量	mol	モル	12 g の $^{12}_6\text{C}$ に含まれる原子数	同左

(アボガドロ数 $6.02 \cdot 10^{23}$) と同数の原子、分子、イオンの量

[新しい単位については、産業技術総合研究所 倉本直樹 打ち合わせ資料による(2018 年 8 月)]

表 I-4-b. SI 国際単位系の SI 補助単位

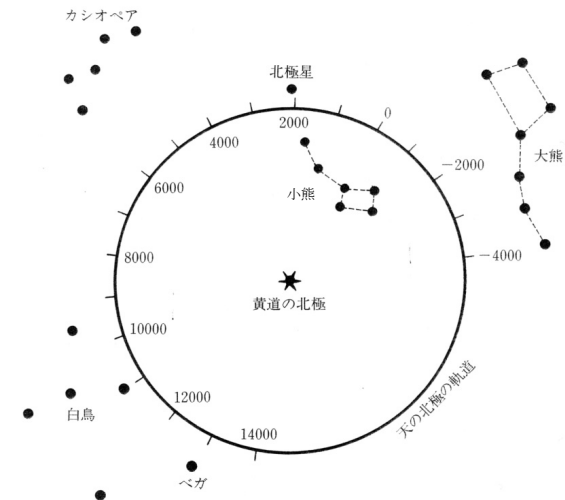
平面角	rad	ラジアン
立体角	sr	ステラジアン

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)
長さ	速度	$\text{m/s} = \text{ms}^{-1}$
	加速度	$\text{m/s}^2 = \text{ms}^{-2}$
	面積	m^2
	体積	m^3
	密度	$\text{kg/m}^3 = \text{kgm}^{-3}$
	角速度	$\text{rad/s} = \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$
	力	$\text{N} = \text{kgm/s}^2 = \text{kgms}^{-2}$ (ニュートン)
	力のモーメント	Nm
	圧力 応力	$\text{Pa} = \text{N/m}^2 = \text{Nm}^{-2}$ (パスカル)
仕事	エネルギー 熱	$\text{J} = \text{Nm}$ (ジュール)
	仕事率 電力	$\text{W} = \text{J/s} = \text{Js}^{-1}$ (ワット)
	周波数	$\text{Hz} = \text{s}^{-1}$ (ヘルツ)

つづき

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



頁 14 : 地軸の向き(北)は宇宙天球に描いた円に沿って移動する (数値は西暦年)

第 I 章 自然の法則と SI 国際単位系 練習問題

[問題 I, 1] 教科書第 V 章「実験 1」、「第 I 章 I - 2. 万有引力の法則」を読んで、物理学の目的について以下の問題に答えよ。

- 問題 I, 1 - 1. 物理学が研究の対象とするものは何か
- 問題 I, 1 - 2. 物理学の目的は、質問「なぜ？」に答えることである。どのような答え方が、物理学としての答か。
- 問題 I, 1 - 3. 君が今、不思議に思うことを、いくつでもよい、列挙せよ。それらは物理学の対象になるかどうかを検討せよ。

[問題 I, 2] 「万有引力の法則」について、教科書 第 I 章「I - 2」「I - 3」「I - 4」「I - 8」「I - 9」および 教科書 第 V 章「実験 4」を読んで、以下の問題に答えよ。

- 問題 I, 2 - 1. この法則の内容を言葉で記述せよ。
- 問題 I, 2 - 2. この法則を、文字を使って式で表せ。ここで、使った文字の意味も記せ。
- 問題 I, 2 - 3. 教科書 第 V 章「実験 4」の式 (V - 2) を使って、この法則を次の場合に当てはめよ。ここで、物体 1 を「地球」とし、物体 2 を「地球表面にある質量 m [kg] の物体」とする。この二つの物体の間に働く万有引力の大きさはいくらか、計算結果を単位 N ニュートンで答えよ。次にこの計算結果を、 m と g を使って示せ。ここで、 g を重力加速度とし、値を 9.8 ms^{-2} とする。
- 問題 I, 2 - 4. この力をなんと呼ぶか、答えよ。
- 問題 I, 2 - 5. 君の質量が 55 kg とする。地球上での君の重さ（重力）はいくらか、単位を N で答えよ。

[問題 I, 3] 数値には単位をつけなければならない。話し手と聞き手で、単位が同じでないと話が通じない。単位の国際的な統一を目指して、1960 年 SI 国際単位系に関する国際条約が結ばれた。この SI 国際単位系について、教科書「第 I 章 最後の表」を参考にして、以下の問題に答えよ。

問題 I, 3 - 1. SI 国際単位系の 7 つの基本単位に関して、以下の①、②、③、④ の問題に、答えよ。ただし、⑤、⑥、⑦は、例として示した。

物理量	[単位の記号]	(単位の読み方)
① 長さ	[]	()
② 質量	[]	()
③ 時間	[]	()
④ 電流	[]	()
⑤ 同一物質の量	[mol]	(モル)
⑥ 絶対温度	[K]	(ケー)
⑦ 光のエネルギー	[cd]	(カンデラ)

最初に述べた通り、数値で表されるものは、すべて「単位」が必要である。単位がないと意味不明になり、誤解されてしまう。従って、全ての量に単位をつけなければならない。

単位は、問題 I, 3 - 1. に挙げた 7 つの基本単位を使うと、他の全ての単位を作り出すことができる。作り方は、7 つの基本単位を、掛け算と割り算で組み合わせで作る。この時、理にかなった組み合わせでなければならない。できた単位を、組立単位 と呼ぶ。以下の問題に答えよ。

問題 I, 3 - 2. 次の量はどのような組立単位か、組立単位は、その量の「意味」または「求め方」を考えると分る。例に従って、《意味・求め方》および [組立単位] を記入せよ。

量	《 意味・求め方 》	[組立単位]
例 面積	《 縦の長さ×横の長さ 》	[$m \times m = m^2$]
体積	《 》	[]
密度	《 》	[]
速度	《 》	[]
加速度	《 》	[]

問題 I, 3 - 3. 単位が特別な名称を持つ場合について、その物理量、その《意味・求め方》、単位の名称、その (記号)、その [組立単位] を例に習って答えよ。

量	《意味・求め方》	特別な名称	(記号)	[組立単位]
例 力	《質量×加速度》	ニュートン	(N)	[mkg s^{-2}]
圧 力	《力/面積》		(Pa)	[Nm^{-2}]
エネルギー・仕事	《力×距離》		(J)	[Nm]
仕 事 率	《エネルギー/時間》		(W)	[Js^{-1}]
電 圧	《仕事率/電流》		(V)	[WA^{-1}]
電 力	《電圧・電流》		(W)	[Js^{-1}]
周 波 数	《1 秒当たりの振動数》		(Hz)	[s^{-1}]
力のモーメント	《力×腕の長さ》	なし		[]

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でこの原理です。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、そして、質量です。

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、慣性力と呼ばれています。バスが曲がる時に受ける遠心力も同じような慣性力です。

この力はガリレオの慣性の法則に基づく力で、運動量の保存法則に由来します。

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場合に受ける力です。回転体の上で物体が移動すると、回転半径の異なる場所へ移動する場合があります。この時、物体自身が自ら動き方を変えて、回転の運動量を調節せねばなりません。その調節のために知らぬ間に受けてしまう力のことを、コリオリの力と呼びます。角運動量の保存法則に由来します。

上記の二つの保存法則は、エネルギーの保存法則と共に、力学の三つの基本保存法則です。すべて重要な自然の法則です。

地球上では、このコリオリの力によってさまざまな現象が起ります。地球が回転しており、その上で動き回っているからです。

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、先に述べたガリレオの慣性の法則、すなわち、運動量の保存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] についてははっきりさせません。単位は $[\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$ で、[キログラムメートル毎秒毎秒] と読みます。

II-1. 止まっている物体の物理学 — 釣り合いの力学 —

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付きません。

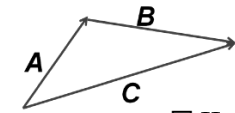


図 II-1. 合力 C

机の上に乗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、重力と呼ばれます。

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、抗力と呼ばれます。

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。合力と呼ばれます。

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

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。

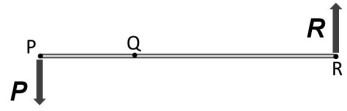


図 II-3. 棒の両端の逆方向の力

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の状態と呼びます。

棒が釣り合うには図 II-4 のように、も一つ力が働かなければなりません。

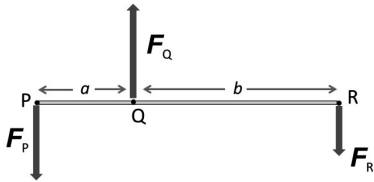


図 II-4. 棒が釣り合う時は三つ以上の力が加わる

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 F_P が、点 Q に上向きの力 F_Q が、点 R に下向きの力 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 : $F_P + F_R$
上向きの力の合計 : F_Q

これらが等しいこと、つまり、

$$F_P + F_R = F_Q \quad (\text{II-1})$$

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

	固定点		
①	$a \times F_P$ 左	$0 \times F_Q$	$b \times F_R$ 右
②	$(a+b) \times F_P$ 左	$b \times F_Q$ 右	$0 \times F_R$
③	$0 \times F_P$	$a \times F_Q$ 左	$(a+b) \times F_R$ 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 $a \times F_P = b \times F_R$ (II-3)
②の場合は $(a+b) \times F_P = b \times F_Q$ (II-4)
③の場合は $a \times F_Q = (a+b) \times F_R$ (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 $a = 0.2 \text{ m}$ 、 $b = 0.5 \text{ m}$ 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 : $F_P = 10 \cdot 9.8 \text{ N}$
点 R に加わる力 : $F_R = 4 \cdot 9.8 \text{ N}$

です。ここで、記号 \cdot は \times の意味です。

式 (II-1) より、点 Q に加わる力 F_Q は、

$$F_Q = F_P + F_R = (10 + 4) \cdot 9.8 \text{ N} = 14 \cdot 9.8 \text{ N}$$

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	$0.2 \cdot 10 \cdot 9.8$ 左 19.6 Nm 左	$0 \cdot 14 \cdot 9.8$ 0	$0.5 \cdot 4 \cdot 9.8$ 右 19.6 Nm 右
②	$(0.2+0.5) \cdot 10 \cdot 9.8$ 左 68.6 Nm 左	$0.5 \cdot 14 \cdot 9.8$ 右 68.6 Nm 右	$0 \cdot 4 \cdot 9.8$ 0
③	$0 \cdot 10 \cdot 9.8$ 0	$0.2 \cdot 14 \cdot 9.8$ 左 27.44 Nm 左	$(0.2+0.5) \cdot 4 \cdot 9.8$ 右 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、荷物を背中にしよって、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**この原理**のこと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 F_P が下向きに、点Rには力 F_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 $d \cdot F_P$ であり、点Rで仮想的にされた**仕事**は $e \cdot F_R$ です。

仮想的にした仕事と
仮想的にされた仕事が等しい

$$d \cdot F_P = e \cdot F_R \quad (\text{II-6})$$

これが**仮想仕事の原理**です。このことから**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見つけました。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。

高等学校の教科書のように、**速さと速度**に意味の違いを持たせる場合があります。その違いは、前者は**大きさ**だけを持ち、後者は**大きさ**と**方向**を同時に持つとします。

このような物理量を前者は**スカラー量**、後者は**ベクトル量**と言います。

速さと速度は、日常的に区別せずに使うことが多いので、この教科書でも、特に区別なく使うことにします。ただし、ベクトルとして考える必要がある場合は、そのことに注意を払って説明することにします。

さて、**ニュートンの運動の法則**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。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つつ読んでください。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。靴を持ち上げてみてください。靴は上にあがってきます。靴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、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よう。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くても、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しいかも知れな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せん。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。つまき**バネの振動**がこの例です。

つまきバネに**錘おもり**をつるすとバネは少し伸びて振動を始めます。

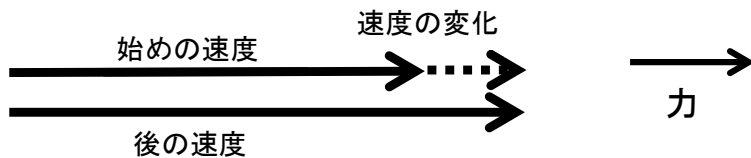


図 II-5 右：力の矢印
 図 II-5 左：始めの速度と後の速度を示す実線矢印
 および速度の変化を示す点線矢印
 動いている方向に力が加わり
 後の速度が始めの速度より増大した場合
 $\text{始めの速度} + \text{速度の変化} = \text{後の速度}$

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。

次に、**速度の変化**と**力の方向**を図に描いて調べてみましょう。図 II-5、図 II-6、図 II-7 と場合に分けました。速度と力を、それぞれ**矢印**で示し、どの図にも、速度を左側に、力を右側に描きました。

速度の矢印は、**矢印の方向を速度の方向**とし、**矢印の長さを速度の大きさ**に比例させることにします。

図 II-5 (前頁) と図 II-6 (下) は、**始めの速度**と**後の速度**が、同方向の場合の図です。図 II-5 (前頁) 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る**、つまり**加速**の場合です。

図 II-6 (下) ではその逆の時です。力が始めの速度と逆方向に加わって、**後の速度が、始めの速度より遅くなる**、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。

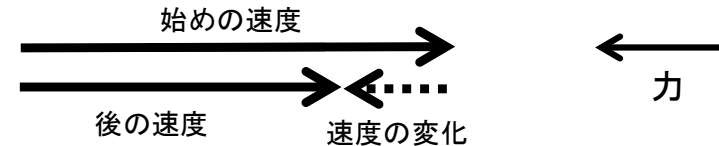


図 II-6 右：力の矢印
 図 II-6 左：始めの速度と後の速度を示す実線矢印
 および速度の変化を示す点線矢印
 動いている方向と逆方向に力が加わり
 後の速度が始めの速度より減少した場合
 $\text{始めの速度} + \text{速度の変化} = \text{後の速度}$

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わっています。

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ります。

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なうと疲れるが、道路で行なうと、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練習法もあるのでしょうか。

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。スピードが上げれば上がるほど、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。

けん玉の球が紐に繋がれて、ぐるぐる回っている時、速度の変わり方を図にしたものです。始めの速度を右向きの矢印とします。球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。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、速度の変化の矢印を点線矢印で描きました。

速度の変化の原因は、紐が球を下向きに引くからです。この瞬間、球は紐に繋がれていますから、下向きに力を受けます。

図II-7では、左側に球の始めと後の速度を、右側にその時加えた力の方向を描きました。

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、横による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、この斜めの力を二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二つに分けるのです。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二つの方向に分けて、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をまとめると、

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

これがニュートンの運動の法則です。



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第2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。**速度の変化を加速度**と名付け、式で表すと、

$$\begin{aligned} \text{力} &= \text{質量} \cdot \text{速度の変化} \quad \text{つまり} \\ \text{力} &= \text{質量} \cdot \text{加速度} \quad (\text{II-7}) \end{aligned}$$

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。速度の変化つまり加速度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、**加える力の方向は加速度の方向と同じ方向**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、**事実がそうになっているのだ**と、答えるだけなのです。

その代わりに、実際にそうになっているかどうかは、**厳密に調べる**必要があります。**事実がそうになっているのだ**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**と名付けました。そして**力が加わると、この運動量が変化**するとなりました。つまり、

$$\text{力} = \text{運動量の変化} \quad (\text{II-7})'$$

式(II-7)も式(II-7)'も、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、私たちが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。事実がそうになっているのです。この事実を発見し、そのことを式(II-7)、または、式(II-7)'のように書いたのが**ニュートン**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、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意味を持ちます。II-3で述べたように、このような量を**ベクトル量**と呼んでいます。

速度 や **力** という言葉に、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。この様な量が、II-3で述べたスカラー量です。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等しい**、つまり**同じ方向**であることを表しています。

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**で表される物理量です。

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。

説明を簡単にするために、まず、東西に延びる直線上を移動する場合を考えましょう。そうすれば分かり易くなります。南北や上下についてもそれぞれ同様に考え、最後に、三つの方向を組にすればよいのです。

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。

$$\text{速度} = \frac{\text{位置の変化}}{\text{変化にかかった時間}}$$

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

II-10. 加速度

次に、式 (II-7) の右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、加速の悪い車など使います。このように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

速度の単位はSI国際単位系でどうなるでしょう。式(II-8)の分母、分子の単位を、それぞれ考えましょう。

分母は時間ですから、SI国際単位系では[秒 s]を使います。分子は位置ですから、基準点(自由に選んでよい)からの長さ・距離です。SI国際単位系では[メートル m]を使います。

従って、速度の単位をSI国際単位系で記述すると $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}} = \text{ms}^{-1}\right]$ 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。

度の定義と同様に、次の式で定義します。

$$\text{加速度} = \frac{\text{速度の変化}}{\text{変化にかかった時間}}$$

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

どれだけの時間の間に、どれだけの速度が変化し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 $[\text{ms}^{-1} \text{メートル毎秒}]$ 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。後の速度から前の速度を引いた、速度の差 1 ms^{-1} を、この変化にかかった時間 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、その単位は容易に、

$$\left[\frac{\text{長さ}}{\text{時間}} = \frac{\text{長さ}}{\text{時間}^2} = \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = \text{ms}^{-2} \right]$$

であることが分かります。

これが、SI 国際単位系で記述した加速度の単位です。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、これがかかった時間 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。

同様な方法で計算すると、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。

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、止まる時には加速度はどうなるでしょう。

この時は、式 (II-9) の分子は、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 $[\text{ms}^{-1}]$	車の加速度 $[\text{ms}^{-2}]$
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-1.1. 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。

$$\begin{aligned} \text{加速度} &= \frac{\text{速度の変化}}{\text{変化にかかった時間}} \\ &= \frac{\text{後の速度}-\text{始めの速度}}{\text{変化にかかった時間}} \end{aligned} \quad (\text{II-9})$$

この式の分子 **速度の変化** は、頁 42 の図 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、その積が点線矢印の長さ、つまり、**速度の変化の大きさ** になります。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。

$$\Delta u = \varphi \cdot u \quad (\text{II-10})$$

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 (一周を 360 度に分けた) の表し方は成り立ちません。

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。全円周の長さは 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、 90° は $\pi/2$ rad です。角度の単位ラジアン rad は、頁 29 の I-1.3 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。

$$\text{円弧の長さ} = \text{半径} \cdot \text{角度} \quad (\text{II-11})$$

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。

$$\text{速度の変化 } \Delta u = \text{速度 } u \cdot \text{角度 } \varphi \quad (\text{II-10})$$

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 AB です。円弧 AB 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。

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

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**

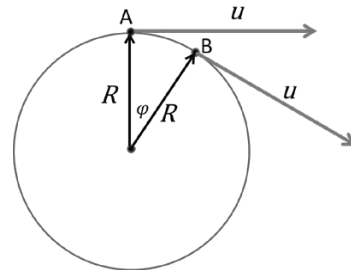


図 II-8 半径 R の円周を走る車の位置と速度の変わり方
図 II-7 は速度 u だけを取り出したものである

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

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、

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

つまり、

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

となり、覚えてください。

式(II-14)の単位は、

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

であり、**[メートル毎秒毎秒]**であることには変わりありません。

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 [rad · 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。ですから、地球の角速度 ω_E は

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

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

$$u_E = 6378137 \text{ m} \cdot 7.27 \cdot 10^{-5} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$= 464 \text{ ms}^{-1}$$

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。

$$\begin{aligned} \text{曲がる時の加速度 } a & \\ &= \text{曲率半径} \cdot (\text{角速度})^2 \\ &= R \cdot \omega^2 \end{aligned} \quad (\text{II-15})$$

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 km · 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 km · h⁻¹ を秒速に換算すると

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

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

となります。この値 3.7 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**わかりますか？**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 [kmh ⁻¹]	秒速 [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 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。

$$\text{曲がる車の中で横向きに受ける遠心力} \\ = \text{自分の質量} \times \text{車の加速度} \quad (\text{II}-16)$$

と

$$\text{逆立ちをした時の片腕の力} \\ = \frac{\text{自分の質量} \times \text{重力加速度 } g}{2} \\ = \text{自分の質量} \times 4.9 \quad (\text{II}-17)$$

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。

$$\text{力} = \text{質量} \times \text{加速度} \quad (\text{II}-18)$$

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

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と 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

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**、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。

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 $[\text{ms}^{-1}]$ および $[\text{ms}^{-2}]$ 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か。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法を使うのが主流になっています。

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。そして、**どの瞬間にも成り立ちます**。

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か。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が、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ません。そのことをニュートンが見抜いたので、**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。

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-1 2 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。

II-1 4. 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、**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。

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、ニュートンの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。

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-1 5. 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 $\left[\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} = \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \right]$ 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。

II-1 6. 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張る**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、**予想せぬ力**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

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

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、テレビでよく見るように**重力**はほぼなくなっています。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。

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、車を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。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。

では曲がる時はどうなっているのでしょうか。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。力は自分の**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ありません。

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稀にあります。

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。

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。急ブレーキによる大きな加速度によって、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。

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。

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。

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。

回転体の上で移動する時に横から受ける力です。移動する物体の**角運動量が保存**されるように働く力です。**角運動量保存の法則**は回転体の持つ**基本法則**です。この法則については、**第V章 実験7 おもちゃの物理学**で、コマを回しながら学びましょう。

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、フィギュア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**と子供の回転半径が減少し、回転スピードが上がるように**コリオリの力**が前向きに加わりません。

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。

受ける力の方向は、**回転軸と移動方向の両方に垂直な方向**です。また、受ける力の大きさは、**回転の速度と移動の速度**に比例します。回転や移動が、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。

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一部分です。

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

しかし、そのまま西風が吹くのではなく、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。

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。

頁43の式 $\text{力} = \text{運動量の変化}$ (II-7)

から、運動量の変化がなく、一定値であることを意味します。

これが、ガリレオの慣性の法則であり、運動量保存則であり、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か。

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が。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。

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。

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。

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、 $9.8m$ [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、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引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、それらの大きさは等しく、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たりなりません。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。

例えば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手段としてニュートンは、新しい数学、微分積分学を創造しました。この素晴らしい方法である数学、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学教育に使ってはいけないと決めているからです。高等学校の数学では、微分積分学を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のでしょうか。

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。

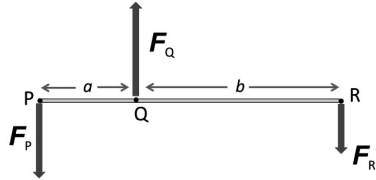
このような状況を打開したいものです。



頁54 ブランコをこぐ子供

第 II 章 ニュートンの運動の法則 練習問題

[問題 II, 1] 図のように、堅い棒 PQR に 3 つの力 F_P 、 F_Q 、 F_R が、鉛直上下方向に加わって、釣り合っている。両端に加わる下向きの力は、点 Q からそれぞれ距離 a [m] および距離 b [m] である。3 つの力 F_P 、 F_Q 、 F_R と距離 a 、 b の間に、どのような関係があるかを考えよう。教科書第 II 章「II-1」を読んで、以下の問題に答えよ。



- 問題 II, 1-1. つり合いの第 1 条件：「棒が全体として、上下方向に動かないこと」。
この条件は、 F_P 、 F_Q 、 F_R の 3 つの力にどのような関係がある時か、式で表せ。
- 問題 II, 1-2. つり合いの第 2 条件：「棒が点 Q の周りに回転しないこと」。これは、棒に加わる左回りの「力のモーメント」と、右回りの「力のモーメント」が等しい場合である。このことを式で表せ。
- 問題 II, 1-3. この図で、 F_P が 200 N、 F_R が 100 N、とする。この棒が釣り合うためには、力 F_Q の大きさはいくらかであればよいか、単位を N で答えよ。
- 問題 II, 1-4. また、距離 a が 0.5 m とする。この棒が釣り合うためには、距離 b はいくらかであればよいか。単位を m で答えよ。

[問題 II, 2] 一直線上を走る車が、時刻 0 秒に走り始め、加速し一定の速度で走った後、減速して 30 秒後に停止した。その間、2 秒毎に速度を測定した。その測定結果を、表に示した。教科書第 II 章 表 II-5. 式 II-8. 式 II-9. を使って、以下の問題に答えよ。

問題 II, 2-1. 次頁の表の「車の加速度」欄の (a) から (r) に、当てはまる数値を求めよ。まず、a, c, f, h, m, r について答よ。(参考：式 (II-9))

- 問題 II, 2-1 a: 時刻 0 s から 2 s の間の加速度
- 問題 II, 2-1 b: 時刻 2 s から 4 s の間の加速度
- 問題 II, 2-1 c: 時刻 4 s から 6 s の間の加速度
- 問題 II, 2-1 d: 時刻 6 s から 8 s の間の加速度
- 問題 II, 2-1 e: 時刻 8 s から 10 s の間の加速度
- 問題 II, 2-1 f: 時刻 10 s から 12 s の間の加速度
- 問題 II, 2-1 g: 時刻 12 s から 14 s の間の加速度
- 問題 II, 2-1 h: 時刻 14 s から 16 s の間の加速度
- 問題 II, 2-1 j: 時刻 16 s から 18 s の間の加速度
- 問題 II, 2-1 k: 時刻 18 s から 20 s の間の加速度
- 問題 II, 2-1 m: 時刻 20 s から 22 s の間の加速度

- 問題 II, 2-1 n: 時刻 22 s から 24 s の間の加速度
- 問題 II, 2-1 p: 時刻 24 s から 26 s の間の加速度
- 問題 II, 2-1 q: 時刻 26 s から 28 s の間の加速度
- 問題 II, 2-1 r: 時刻 28 s から 30 s の間の加速度

問題 II, 2-2. 下表の「A」の欄には、車に加わった力の方向を、(力はゼロ、進行方向、進行に逆方向)の中から選んで答えよ。

問題 II, 2-3. 下表の「B」欄には、この車に乗っている質量 55 kg の人が受ける慣性力の大きさを、単位 N で答えよ。

問題 II, 2-4. 下表の「C」欄には、「B」欄の力の「方向」を (力はゼロ、進行方向、進行に逆方向)の中から選んで答えよ。

時刻 単位[s 秒]	車の速度 [ms ⁻¹]	車の加速度 [ms ⁻²]	「A」	「B」	「C」
0	0				
1		(a)	()	()	()
2	1				
3		(b)	()	()	()
4	3				
5		(c)	()	()	()
6	6				
7		(d)	()	()	()
8	8				
9		(e)	()	()	()
10	9				
11		(f)	()	()	()
12	10				
13		(g)	()	()	()
14	10				
15		(h)	()	()	()
16	10				
17		(j)	()	()	()
18	9				
19		(k)	()	()	()
20	8				
21		(m)	()	()	()
22	6				
23		(n)	()	()	()
24	3				
25		(p)	()	()	()
26	2				
27		(q)	()	()	()
28	1				
29		(r)	()	()	()
30	0				
時刻	車の速度	車の加速度	「A」	「B」	「C」

[問題 II, 3] 曲がる時の加速度について、教科書「II - 1 1」を読んで、次の問題に答えよ。
ここで、式 (II-13)、式 (II-14) を使うこと。また、数値計算をする場合、曲率半径の単位は、m メートルで、速さの単位は、 ms^{-1} メートル毎秒で表した数値を使用すること。

問題 II, 3 - 1. 曲率半径 R [m] の円を描いて、速さ u [$\frac{\text{m}}{\text{s}} = \text{ms}^{-1}$] で走る車の加速度は、どのような式で表されるか、答えよ。

高速道路を時速 108 kmh^{-1} で走る車が、曲率半径 600 m のカーブを右に曲がっている。この車の質量を 550 kg とする。また、この車には質量 55 kg の人が乗っているとすると、以下の問題に答えよ。

- 問題 II, 3 - 2. この車の速度を、単位 ms^{-1} で求めよ。
 問題 II, 3 - 3. この車の加速度を、単位 ms^{-2} で求めよ。
 問題 II, 3 - 4. この車を曲げるために、タイヤを通して力が加わっている。その力の大きさを、単位 N で求めよ。
 問題 II, 3 - 5. 車に加わるその力の方向を答えよ。
 問題 II, 3 - 6. この車に乗っている人に加わる慣性力（日常的にはこの力を遠心力と呼ぶ）の大きさを、単位 N で求めよ。
 問題 II, 3 - 7. その人が受ける力の方向を答えよ。

[問題 II, 4] 車いすやストレッチャーを押す時にどのような注意が必要か、乗っている人が受ける慣性力を考慮して、箇条書きにせよ。ここで、教科書「II - 1 6」を参考にすること。

[問題 II, 5] 地球のような回転する物の上で、移動する物体は、横から一見「いわれのない力」を受ける。この力はコリオリの力と呼ばれる慣性力である。教科書「II - 1 7」を読んで、以下の問題に答えよ。

問題 II, 5 - 1. 我々の身の回りには、コリオリの力による色々な現象が現れる。理由は地球が回転しており、我々は地球上で動き回っているからである。これは地球上で動く全ての物体に当てはまる。コリオリの力による自然現象の例を 2 つ挙げよ。

問題 II, 5 - 2. 自然現象だけでなく、子供がブランコをこぐときもコリオリの力を利用して、揺れを大きくしていると言える。ブランコの往復は、上部の支点を中心とした回転運動である。子供はブランコに乗って、ブランコの往復に調子を合わせて、足を曲げたり伸ばしたりして、上下に動いている。このことを近くの公園でブランコを漕いで、揺れが大きくなることを確かめよ。

[問題 II, 6] ニュートンの運動の三法則について、教科書「II - 1 2」「II - 1 8」「II - 1 9」を読んで、以下の問題に答えよ。

- 問題 II, 6 - 1. ニュートンの運動の第 1 法則を言葉で記述せよ。
 問題 II, 6 - 2. ニュートンの運動の第 2 法則を言葉で記述せよ。
 問題 II, 6 - 3. ニュートンの運動の第 2 法則を式で記述せよ。文字を使った場合、その文字の意味を記入せよ。
 問題 II, 6 - 4. ニュートンの運動の第 3 法則は、「作用反作用の法則」とも呼ばれる。この法則を言葉で記述せよ。
 問題 II, 6 - 5. 運動会で行なわれる「綱引き競技」の勝負は、どのように決まるか説明せよ。

[問題 II, 7] 地球の自転による加速度を赤道および北緯 45 度で求めよ

- [解き方の順序] ① 地球の自転の角速度 [rad/s] を計算する。
 ② 赤道の人、北緯 45 度の人、それぞれの、回転半径を求める。
 ③ 教科書「II - 1 1」の式 (II - 15) を使って加速度を求める。

[問題 II, 8] 公園のブランコに乗る子供の受ける加速度の最大値はどれ位だろうか考えよ。

- [解き方の順序] ① ブランコの長さから回転半径を 1.5 m としよう。
 ② 周期を 2 秒として、最高速度はおおよそ 1 m/s としてみよう。
 ③ 教科書「II - 1 1」の式 (II - 14) を使って加速度を求める。

[問題 II, 9] 君が車いすに患者を乗せて、病院の廊下を押して、秒速 1 m/s で歩いている。曲がり角で、患者が受ける遠心力を、単位を N で求めよ。ここで、廊下の曲がり角での曲率半径、および、患者の質量は、それらしい値を見積もって、計算せよ。

- [解き方の順序] ① 車いす回転半径を見積もること
 ② 速度はおおよそ 1 m/s を保って曲がるとしよう
 ③ 教科書「II - 1 1」の式 (II - 14) を使って加速度を求める
 ④ 車いすの加速度の方向を考えよう
 ⑤ 患者の質量を適当に見積もること
 ⑥ 患者の質量と③で求めた加速度の大きさから、患者の受ける慣性力（遠心力）の大きさを計算する。
 ⑦ 患者の受ける慣性力（遠心力）の方向を考える

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 occurred。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、原子核や放射能にまつわる多くの話題を講義することとし、教科書を完成させました。物理学の重要なテーマです。

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を取り出すことができます。その代償は**放射能**でした。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**の温泉に出かけました。この温泉は、**出雲風土記**に**漆仁の湯**として掲載されている、日本最古の湯治場です。湯は適当な温度で湧き出ており、加熱加水の必要のない、昔ながらの伝統を守る柔らかい湯の温泉です。

「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**の映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きているか
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。そのため原子について、まず学ばねばなりません。

原子は、物質を構成するもっとも基礎となる粒子です。同種・異種を問わず、また個数を問わず、原子同士が**結合**してあらゆる物質を造ります。

原子同士の結合は**化学**で学びます。また、造り出された物質の**構造**や**性質**については、**物質科学**や**物質物理学**の分野で学びます。しかし、これらの分野は、この教科書ではほとんど取り上げません。

この第 III 章では、**原子核エネルギー**のことを学ぶことが目的です。

そのためにまず、**原子の大きさ**、**原子の質量**、**原子の構造**から学びましょう。

そして、この章の話題の中心は、原子の中心にある**原子核**です。**原子核**について、詳しく学ぶことになります。

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。

この起こりはほぼ200年さかのぼります。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^{-26} 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68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**

(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。

質量の最も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番目がカーボン(炭素)、7番目が窒素、8番目が酸素、9番目がフッ素、10番目がネオン、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

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となります。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。

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はロシアの化学者メンデレーフによります。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**ですから、元素番号と呼ぶのが正しいのですが、習慣で、原子番号と呼びます。英語で Number of Elements です。

この教科書では、**原子(元素)番号**と呼ぶことにします。頁68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。

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。

では、原子の中心にある原子核は何からできているのでしょうか。

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。

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 ${}^3_1\text{H}$ 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付きません。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、後に述べるように、体内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、

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

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、 ${}^{16}_8\text{O}$
(質量数16:陽子8個、中性子8個)
- ② **酸素17**、記号で、 ${}^{17}_8\text{O}$
(質量数17:陽子8個、中性子9個)
- ③ **酸素18**、記号で、 ${}^{18}_8\text{O}$
(質量数18:陽子8個、中性子10個)

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。

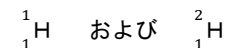
原子(元素)番号=陽子の数=電子の数

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が、質量数が違い質量が異なります。

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**などとしします。記号では次式です。



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 ${}^1_1\text{H}$ 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 ${}^2_1\text{H}$ 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。

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いても同じ元素の原子です。

天然にある元素の種類は、頁68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。これらを見69から76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はありません。

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69から76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1u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 ¹²C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12uとしました。

頁69の表III-2(その1)中の炭素12 ¹²C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69から76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																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																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 ルルチウム	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 オスマニウム	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 ラザフォード	105 Db ドブニウム	106 Sg シボグニウム	107 Bh ボヘリウム	108 Hs ハツチウム	109 Mt メトリウム	110 Ds ダズニウム	111 Rg レングニウム	112 Cn コペルニウム	113 Nh ニホニウム	114 Fl フロロニウム	115 Uup ユウペコニウム	116 Lv リバモニウム	117 Uus ユウゼニウム	118 Uuo ユウオニウム		
	57 La ランタノイド	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 イットリウム	71 Lu ルテチウム					
	89 Ac アクチノイド	90 Th トリウム	91 Pa プロアクチニウム	92 U ウラン	93 Np ネプチウム	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 エンスニウム	100 Fm フェルミウム	101 Md メンデレフ	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ないことを示す。
備考: 原子番号104番以後の超アクチノイドの周期表の位置は暫定的である。

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

1	2	3	4	5	6	7	8
元素記号	原子(元素)番号	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
	陽子数						第7列 の 和[u]
K	19	39	38.96371	0.99907	93.2581	36.337	39.10
	19*	40	39.96400	0.99910	0.0117	0.005	
	19	41	40.96183	0.99907	6.7302	2.757	
Ca	20	40	39.96259	0.99906	96.941	38.740	40.08
	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	
Sc	21	45	44.95591	0.99902	100	44.956	44.96
Ti	22	46	45.95263	0.99897	8.25	3.791	47.87
	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	
V	23*	50	49.94716	0.99894	0.25	0.125	50.94
	23	51	50.94396	0.99890	99.75	50.817	
Cr	24	50	49.94604	0.99892	4.345	2.170	52.00
	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	
Mn	25	55	54.93804	0.99887	100	54.938	54.94
Fe	26	54	53.93961	0.99888	5.845	3.153	55.85
	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	
Co	27	59	58.93319	0.99887	100	58.933	58.93
Ni	28	58	57.93534	0.99889	68.0770	39.441	58.69
	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	
Cu	29	63	62.92960	0.99888	69.15	43.528	63.55
	29	65	64.92779	0.99889	30.85	20.030	
Zn	30	64	63.92914	0.99889	49.17	31.434	65.38
	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	

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	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	69.72
	31	71	70.92470	0.99894	39.892	28.293	
Ge	32	70	69.92425	0.99892	20.57	14.383	72.63
	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	
As	33	75	74.92159	0.99895	100	74.922	74.92
Se	34	74	73.92248	0.99895	0.89	0.658	78.97
	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	
Br	35	79	78.91834	0.99897	50.69	40.004	79.90
	35	81	80.91629	0.99897	49.31	39.900	
Kr	36	78	77.92036	0.99898	0.355	0.277	83.80
	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	
Rb	37	85	84.91179	0.99896	72.17	61.281	85.47
	37*	87	86.90918	0.99896	27.83	24.187	
Sr	38	84	83.91342	0.99897	0.56	0.470	87.62
	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	
Y	39	89	88.90584	0.99894	100	88.906	88.91
Zr	40	90	89.90470	0.99894	51.45	46.256	91.22
	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	
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	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	95.95
	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	
Ru	44	96	95.90759	0.99904	5.54	5.313	101.1
	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	
Rh	45	103	102.90550	0.99908	100	102.906	102.9
Pd	46	102	101.90560	0.99907	1.02	1.039	106.4
	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	
Ag	47	107	106.90509	0.99911	51.839	55.419	107.9
	47	109	108.90476	0.99913	48.161	52.450	
Cd	48	106	105.90646	0.99912	1.25	1.324	112.4
	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	
In	49	113	112.90406	0.99915	4.29	4.844	114.8
	49*	115	114.90388	0.99916	95.71	109.975	

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 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]
	陽子数	核子数					
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	121.8
	51	123	122.90421	0.99922	42.79	52.591	
Te	52	120	119.90405	0.99920	0.09	0.108	127.6
	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		
I	53	127	126.90447	0.99925	100	126.904	126.9
Xe	54	124	123.90589	0.99924	0.0952	0.118	131.3
	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		
Cs	55	133	132.90545	0.99929	100	132.905	132.9
Ba	56	130	129.90632	0.99928	0.106	0.138	137.3
	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		

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 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]
	陽子数	核子数					
La	57*	138	137.90711	0.99933	0.08881	0.123	138.9
	57	139	138.90636	0.99933	99.91119	138.783	
Ce	58	136	135.90713	0.99932	0.185	0.251	140.1
	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	
Pr	59	141	140.90766	0.99935	100	140.91	140.9
Nd	60	142	141.90773	0.99935	27.152	38.531	144.2
	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	
Sm	60	150	149.92090	0.99947	5.638	8.453	150.4
	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	
Eu	62	152	151.91974	0.99947	26.75	40.639	152.0
	62	154	153.92222	0.99949	22.75	35.017	
	63	151	150.91986	0.99947	47.81	72.15	
	63	153	152.92124	0.99949	52.19	79.81	
Gd	64*	152	151.91980	0.99948	0.20	0.306	157.3
	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		
Tb	65	159	158.92535	0.99953	100	158.925	158.9
Dy	66	156	155.92428	0.99951	0.056	0.087	162.5
	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		
Ho	67	165	164.93033	0.99958	100	164.930	164.9

1	2	3	4	5	6	7	8
元素 記号	原子 (元素) 番号	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]
Er	68	162	161.92879	0.99956	0.139	0.225	167.3
	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	
Tm	69	169	168.93422	0.99961	100	168.9342	168.9
Yb	70	168	167.93389	0.99961	0.123	0.218	173.1
	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	
Lu	71	175	174.94078	0.99966	97.401	170.394	175.0
	71	176	175.94269	0.99967	2.599	4.573	
Hf	72*	174	173.94005	0.99966	0.16	0.278	178.5
	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	
Ta	73*	180	179.94746	0.99971	0.01201	0.022	180.9
	73	181	180.94800	0.99971	99.98799	180.926	
W	74	180	179.94671	0.99970	0.12	0.216	183.8
	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	
Re	75	185	184.95295	0.99975	37.40	69.172	186.2
	75*	187	186.95575	0.99976	62.60	117.034	
Os	76	184	182.95249	0.99974	0.02	0.037	190.2
	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	

1	2	3	4	5	6	7	8
元素 記号	原子 (元素) 番号	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]
Ir	77	191	190.96059	0.99979	37.3	71.228	192.2
	77	193	192.96292	0.99981	62.7	120.988	
Pt	78*	190	189.95993	0.99979	0.012	0.023	195.1
	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	
Au	79	197	196.96657	0.99983	100	196.967	197.0
Hg	80	196	195.96583	0.99983	0.15	0.294	200.6
	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	
Tl	81	203	202.97234	0.99986	29.52	59.926	204.4
	81	205	204.97443	0.99988	70.48	144.458	
Pb	82	204	203.97304	0.99987	1.4	2.856	207.2
	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	
	82	208	207.97665	0.99989	52.4	108.980	
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	238.0
	92*	235	235.04393	1.00019	0.7204	1.693	
	92*	238	238.05079	1.00021	99.2742	236.323	

III-5. 原子量

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、正確さを求めて変わってきました。

今では、前述のように 1 個の**炭素 12** $^{12}_6\text{C}$ 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。

$$1 \text{ u} = 1.6605 \times 10^{-27} \text{ kg} \quad (\text{III-1})$$

この値はアボガドロ数個の炭素 12 ($^{12}_6\text{C}$) が、ちょうど $12 \text{ g} (= 12 \cdot 10^{-3} \text{ kg})$ 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が。

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 70 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 72 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} は次の式で求められます。

$$\begin{aligned} M_{\text{Ag}} &= 106.905 \times 0.51839 \\ &\quad + 108.905 \times 0.48161 \\ &= 55.419 + 52.450 = 107.868 \\ &= 107.9 \text{ u} \end{aligned}$$

式(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。

$$107.9 \cdot 1.6605 \cdot 10^{-27} = 1.791 \cdot 10^{-25} \text{ kg}$$

一方、銀原子 1 mol は、 $107.9 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$ であり、そこにはアボガドロ数 $6.02 \cdot 10^{23}$ 個の銀原子が存在するので、銀原子 1 個の平均質量は、

$$\frac{107.9 \times 10^{-3}}{6.02 \times 10^{23}} = 1.791 \times 10^{-25} \text{ kg}$$

となり、同じ値になります。

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が。

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ウム Nd142 $^{142}_{60}\text{Nd}$ を例にとって厳密に調べてみましょう。**頁 74 の図表 III-2 (その 6)**のニオジウム 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 102 の**図表 III-9 第 5 列**の数値) を使って。

$$1.007277 \text{ u} \times 60 = 60.4366 \text{ u}$$

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、

$$1.008665 \text{ u} \times (142 - 60) = 82.7105 \text{ u}$$

これらの和は 143.1471 u です。

一方、Nd142 の質量の**実測値**は、**頁 74 の図表 III-2**にある通り 141.9077 u で、差 $\Delta M = 1.2394 \text{ u}$ 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、地球がその物体を引く力です。それを支えるには**力**を出して、**重力を重さ**として実感します。

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。テレビで見える宇宙飛行士は、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のではありません。質量は変化しません。

このことからわかるように**重力(おもさ)**は、測る場所によって異なります。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よう。

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」としてきました。

長さについて 1 m 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)。誰でもどこでも手にすることのできるように決めてあります。

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

質量についても、質量 1 kg 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。

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。

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。

$$E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}} \\ \cong m_0 c^2 + \frac{1}{2} m_0 u^2 \quad (\text{III-2})$$

ここで、

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

E : 物体の持つ全エネルギー

m : 物体の質量

c : 光の速度 (3×10^8 m/s)

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 (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 u 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 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

$$\begin{array}{l} \text{第1項} \quad m_0 c^2 \\ \text{第2項} \quad \frac{1}{2} m_0 u^2 \end{array}$$

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**

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

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。物体全体が静止していても、物質を構成する原子分子は激しく運動しています。しかも、その運動は温度が上がると、その動きが激しくなり、原子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、**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 $(3 \times 10^8)^2 = 9 \times 10^{16}$ 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。

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 $30000 \text{ ms}^{-1} (= 30 \text{ kms}^{-1})$ 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。

$$\begin{aligned} \frac{\text{第1項}}{\text{第2項}} &= \frac{\text{地球の静止質量エネルギー}}{\text{地球の運動エネルギー}} = \frac{m_0 c^2}{\frac{1}{2} m_0 u^2} \\ &= 2 \left(\frac{c}{u} \right)^2 = 2 \left(\frac{3 \cdot 10^8}{3 \cdot 10^4} \right)^2 = 2 \cdot 10^8 \end{aligned}$$

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 ms^{-1} として比較しましょう。時速 360 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、

$$\begin{aligned} \frac{\text{第1項}}{\text{第2項}} &= \frac{\text{新幹線の静止質量のエネルギー}}{\text{新幹線の運動のエネルギー}} = \frac{m_0 c^2}{\frac{1}{2} m_0 u^2} \\ &= 2 \left(\frac{c}{u} \right)^2 = 2 \left(\frac{3 \cdot 10^8}{10^2} \right)^2 = 1.8 \cdot 10^{13} \end{aligned}$$

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、区別のないものに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。

$$E_d = \Delta m_0 c^2 \quad (\text{III-3})$$

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-1 1. 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います。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が、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が。

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-1 2. 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。

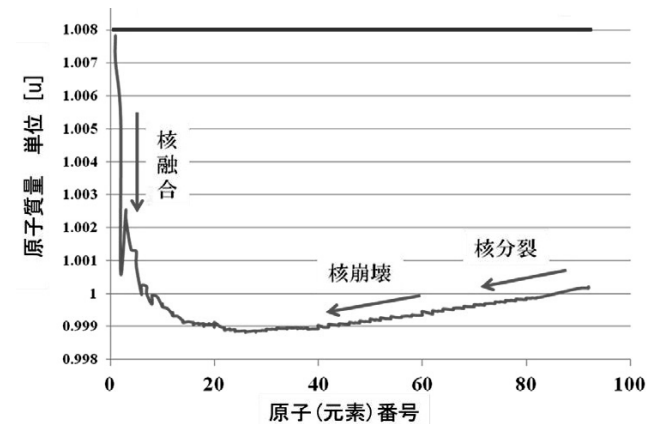
これは、核子1個分の質量欠損ですから、実際の質量欠損を知るためには、この差を核子数倍する必要があります。

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、最小値をとりません。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70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言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。

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

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、研究だけな

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。現在知られている**放射性原子核**の総数は約 3000 種類です。

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となります。

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滿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 87 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。

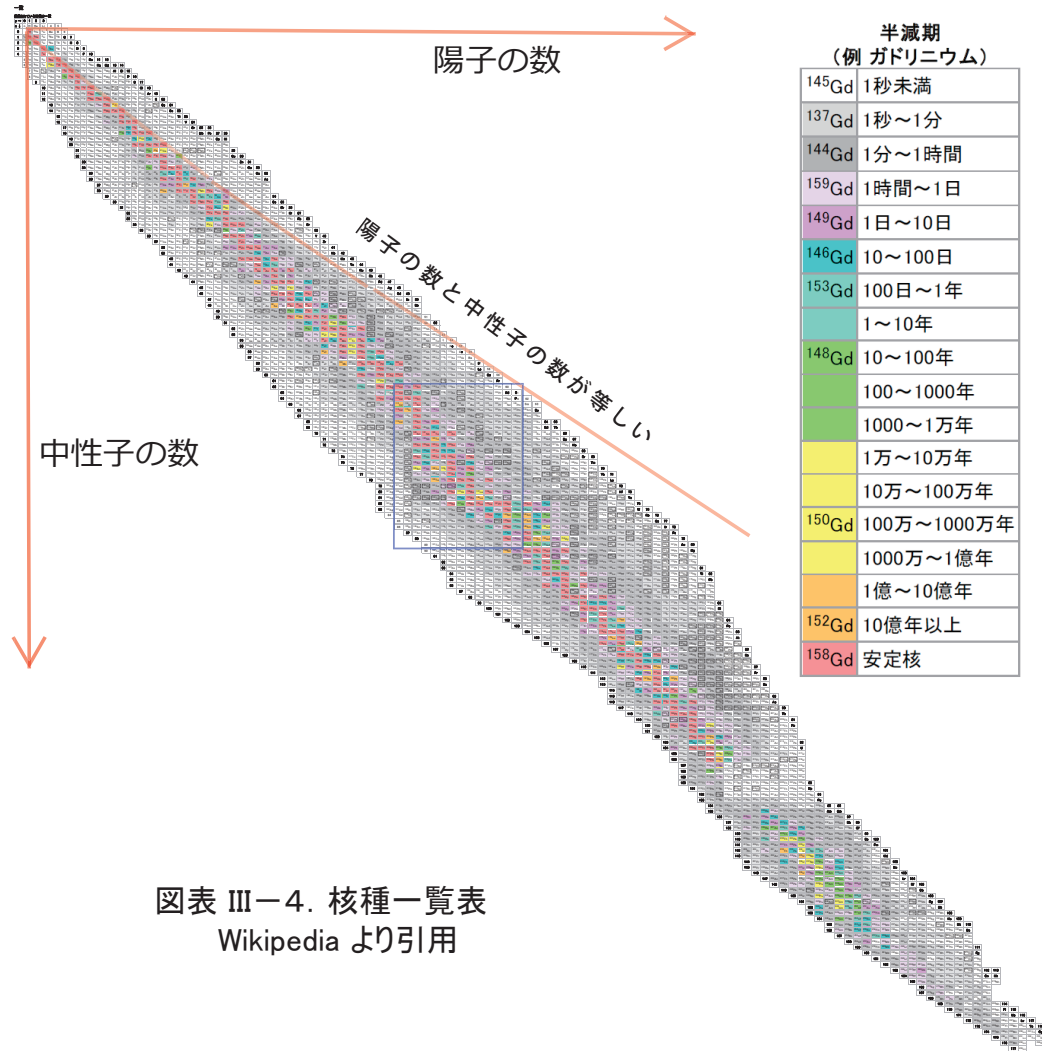
前に述べた、不安定な放射性原子核の総数 3000 は、この図から概算した値です。雲のように広がった範囲に同位体が分布します。原子核の持つ陽子の数と中性子の数は、各々横軸と縦軸が示しています。

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 88 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://www.ndc.jaea.go.jp/CN10/index.html>
を参考にしてください。



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 In	¹³⁸ Sn	¹³⁹ Sb	¹⁴⁰ Te	¹⁴¹ I	¹⁴² Xe	¹⁴³ Cs	¹⁴⁴ Ba	¹⁴⁵ La	¹⁴⁶ Ce	¹⁴⁷ Pr	¹⁴⁸ Nd	¹⁴⁹ 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。

同時に中性子も2個減ります。質量数は4だけ減少します。この時放出される α 粒子は、 α 線とも呼ばれます。

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、中性子1個が陽子に変化します。後者では逆に陽子1個が

中性子に変わります。質量数是不変ですが、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 $[Gy = J \cdot kg^{-1}]$

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 1 kg あたり 1 J (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、 $[Gy = J \cdot kg^{-1}]$ 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。

III-17. 放射能とその単位ベクレル $[Bq = s^{-1}]$

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

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。

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。

1 kg 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 1 kg 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 1 kg の中に、14 億 $\times 100 = 1400$ 億個の**セシウム Cs 137**があり、1秒間にその 14 億分の 1 つまり 100 個が崩壊して減少してゆくということです。この割合で減少すると、1400 億の半分になるのに 30 年必要です。

原子の数は膨大で、魚 1 kg 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 $= 1.4 \times 10^{11}$ 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こととします。

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 万人の集団の隣の町では、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。

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

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。

隣の町では、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。

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。

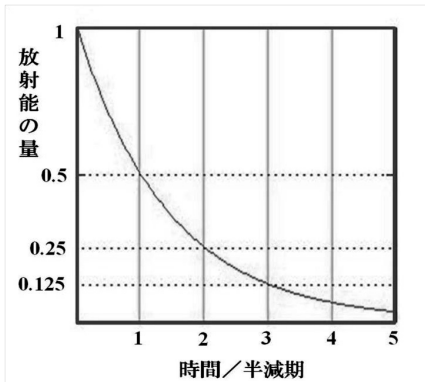
半分になるまでの時間のことを**半減期**と言います。比例定数である崩壊確率 λ は原子核によって異なるので、半減期は原子核によってまちまちです。

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、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います。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。

$$\frac{N(t)}{N_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}} \quad (\text{III-4})$$

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式です。

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、

$$-\frac{dN(t)}{dt} = \lambda N(t) \quad (\text{III-5})$$

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

$$\lambda \times T = 0.693 \quad (\text{III-6})$$

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、

$$e = 2.718281828\dots \text{ は数学定数です。}$$

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、 $1 \mu\text{g} (= 1 \cdot 10^{-9} \text{ kg})$ 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 $1 \mu\text{g}$ 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 69~76 の**図表 III-2 第 5 列**の数値、および、頁 84 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 84 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 1H の原子核 4 個が融合して、原子(元素)番号 2 のヘリウム 4He 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、原子(元素)番号 92 番 (頁 76) 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 73) 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 ($_{56}\text{Ba}$) 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 70~74) 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 とすることもある)

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。

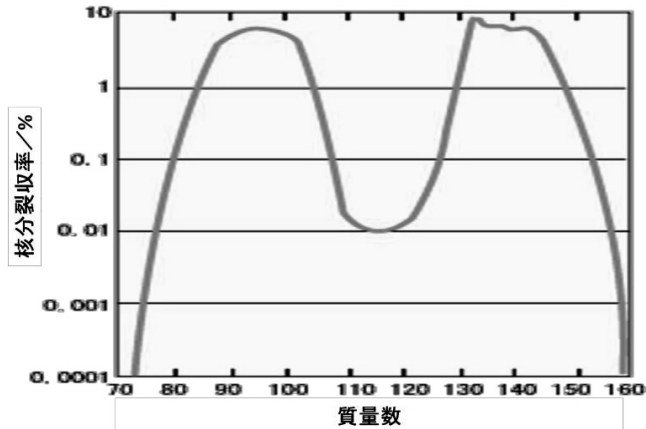
そのほか、生体に取り込まれやすい元素は、体内に多くある Na や K と同じ 1 価金属元素と Ca と同じ 2 価の金属元素が考えられます。化学的性質が似ているからです。

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、安定原子核に向かいます。これには長い時間、おそらく千万年程度の時間がかかります。その間、熱と放射能を放出し続けます。

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
⁸⁶ 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 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約 3000 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で、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ある。これらは、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

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。

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、多くの原爆実験が行われ、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。

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} ($18.95 \times 10^3 \text{ kgm}^{-3}$) 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** の濃度が下がります。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。

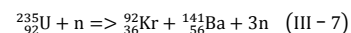
核分裂で放出される中性子のエネルギーとその量を制御し、行き過ぎないように、しかし、逆に止まってしまうないように、絶妙に**臨界状態を維持**させているのが発電用原子炉です。そこでは水やカーボンが中性子の減速材として利用されています。

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があります。この時に熱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。

III-2.2. 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。



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。

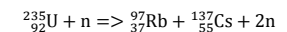
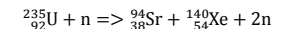
突発事故が起っても、**臨界質量**を越える塊を絶対に作ってはいけないのです。暴走を始める危険性は全くないのでしょうか。

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か。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。

核分裂と原子爆弾について、物理学辞典（培風館 1984 年）を参考にしました。



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。左側の放射性ウラン 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、右側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。

$$\begin{aligned} \text{左辺の質量 [u]} &= {}^{235}_{92}\text{U} + n \\ &= 235.04392 + 1.008665 \\ &= 236.0526 \text{ u} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{右辺の質量 [u]} &= {}^{92}_{36}\text{Kr} + {}^{141}_{56}\text{Ba} + 3n \\ &= 91.9061 + 140.9031 \\ &\quad + 1.008665 \times 3 \\ &= 235.8353 \text{ u} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{質量の差 } \Delta m_{\text{U}} &= \text{左辺} - \text{右辺} \\ &= 236.05259 - 235.83528 \\ &= 0.2173 \text{ u} \\ &= 0.2173 \text{ u} \times 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg/u} \\ &= 0.36085 \times 10^{-27} \text{ kg} \\ \text{よって} \\ \Delta m_{\text{U}} &= 0.36085 \times 10^{-27} \text{ kg} \quad (\text{III-8}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{0.36085 \times 10^{-27} \text{ kg}}{1.78299 \times 10^{-36} \text{ kg/eV}} \\ &= 202.4 \times 10^6 \text{ eV} \end{aligned}$$

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) $E_{\text{d}} = \Delta mc^2$ 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_{doU} は次式となり、単位は J です。

$$\begin{aligned} E_{\text{doU}} &= \Delta m_{\text{U}} c^2 \\ &= 0.36 \times 10^{-27} \text{ kg} \times (3 \times 10^8)^2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2} \\ &= 3.24 \times 10^{-11} \text{ kgm}^2 \text{ s}^{-2} (= \text{J}) \end{aligned}$$

ウラン 235 の原子 1 g (1×10^{-3} kg) 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 $6.02 \cdot 10^{23}$ 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。

$$\begin{aligned} E_{\text{TU}} &= n_{\text{U}} E_{\text{doU}} = \frac{1}{235} N_{\text{A}} E_{\text{doU}} \\ &= \frac{1 \times 6.02 \cdot 10^{23} \times 3.24 \cdot 10^{-11}}{235} \\ &= 72 \cdot 10^9 \text{ J} = 72 \cdot 10^6 \text{ kJ} \quad (\text{III-9}) \end{aligned}$$

一方、温度が 0°C の水 1 g (1×10^{-3} kg) が、100°C で沸騰して蒸気にな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。

$$\begin{aligned} E_{\text{W}} &= (100 + 540) \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \\ &\quad \times 4.2 \frac{\text{kJ}}{\text{kcal}} \times 1 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \\ &= 2.7 \text{ kJ} \quad (\text{III-10}) \end{aligned}$$

式 (III-9) と式 (III-10) の数値の違いは、 27×10^6 倍です。つまり、質量 1 g のウラン 235 の核分裂によって、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	質量数	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 陽子 電子		1	n	1.008665	1.008665	1.6749
		1	p	1.007277	1.007277	1.6726
			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
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
				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
				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、急な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。



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。

$$\begin{aligned} \text{左辺の質量 [u]} &= 4 \times 1.007825 \\ &= 4.0313 \text{ u} \end{aligned}$$

$$\text{右辺の質量 [u]} = 4.0026 \text{ u}$$

$$\begin{aligned} \text{質量の差 } \Delta m_{\text{He}} &= \text{左辺} - \text{右辺} \\ &= 4.0313 - 4.0026 = 0.0287 \text{ u} \\ &= 0.0287 \text{ u} \times 1.660539 \times 10^{-27} \frac{\text{kg}}{\text{u}} \\ &= 0.04765 \times 10^{-27} \text{ kg} \quad (\text{III-12}) \\ &= \frac{0.04765 \times 10^{-27} \text{ kg}}{1.78299 \times 10^{-36} \frac{\text{kg}}{\text{eV}}} \\ &= 26.7 \times 10^6 \text{ eV} \end{aligned}$$

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 $E_d = \Delta mc^2$ 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_{doHe} は、次式となります。

$$\begin{aligned} E_{\text{doHe}} &= \Delta m_{\text{He}} c^2 \\ &= 0.0476 \times 10^{-27} \text{ kg} \times (3 \times 10^8)^2 \text{ m}^2/\text{s}^2 \\ &= 0.428 \times 10^{-11} \text{ kgm}^2/\text{s}^2 \\ &= 0.428 \times 10^{-11} \text{ J} \end{aligned}$$

ヘリウム原子1g ($1 \times 10^{-3} \text{ kg}$) 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4u、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。

$$\begin{aligned} E_{\text{The}} &= n_{\text{He}} E_{\text{doHe}} = \frac{1}{4} N_A E_{\text{doHe}} \\ &= \frac{1 \times 6.02 \times 10^{23} \times 0.428 \times 10^{-11}}{4} \\ &= 640 \times 10^9 \text{ J} = 640 \times 10^6 \text{ kJ} \quad (\text{III-13}) \end{aligned}$$

温度が0°Cの水1gが沸騰して蒸気に変わる時に必要なエネルギー E_w は、

$$E_w = 2.7 \text{ kJ} \quad \text{式(III-10)}$$

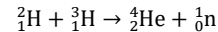
です。式(III-13)の数値は、この値の 240×10^6 倍です。つまり、質量1gのヘリウム原子核の核融合によって、240トンの水を沸騰させることができる計算になります。

太陽内部のこの反応は、

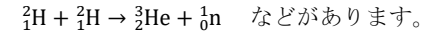
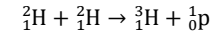
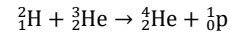
$$\begin{aligned} \text{圧力が } 1.4 \times 10^{11} \text{ 気圧} &= 1.42 \times 10^{16} \text{ Pa} \\ \text{温度が } 1.5 \times 10^7 \text{ K} \\ \text{密度が } 1.2 \times 10^8 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

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。



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



ここで、 n は中性子、 p は陽子を表わします。 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。

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 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、 $\text{Li} \rightarrow \text{H} + \text{He}$ 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、 ^3H , ^7Be , ^{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 ^3H , ^{14}C について詳しく述べることにします。

^{40}K カリウム40 の場合

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}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}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}K)は、同位体存在度 1.18×10^{-4} 、半減期 $1.25 \cdot 10^9 \text{ y}$ 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 1.46 MeV 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 $1.62 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ 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 6.0×10^{23} を使って、

$$S_{\text{KT}} = M_{\text{K}} \cdot 6.0 \times 10^{23} = \frac{120}{39.1} \cdot 6.0 \times 10^{23} \\ = 1.84 \times 10^{24} \text{ 個}$$

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、

$$N_{\text{K40}} = S_{\text{KT}} \times 1.18 \times 10^{-4} \\ = 1.84 \times 10^{24} \times 1.18 \times 10^{-4} \\ = 2.17 \times 10^{20} \text{ 個}$$

一方、放射性 K40 (^{40}K) の半減期 T_{K40} は、

$$T_{\text{K40}} = 1.25 \cdot 10^9 \text{ y} \\ = 1.25 \cdot 10^9 \cdot 365.25 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 \text{ s} \\ = 3.94 \cdot 10^{16} \text{ s}$$

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、

$$n_{\text{K40}} = \lambda N_{\text{K40}} = \frac{0.693}{T_{\text{K40}}} N_{\text{K40}} \\ = \frac{0.693 \cdot 2.18 \cdot 10^{20}}{3.94 \cdot 10^{16}} \\ \approx 3800 \text{ Bq ベクレル}$$

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。体重 1 kg 当たり、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、

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{c}{\frac{\varepsilon}{h}} = \frac{ch}{\varepsilon}$$

ここで、 h はプランク定数、 $6.63 \times 10^{-34} \text{ Js}$ 、 c は真空中の光速、 $3.0 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ である。 γ 線のエネルギー $\varepsilon = 1.46 \text{ MeV}$ に、 $1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$ を使うと、

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{1.46 \text{ MeV}} \\ = \frac{19.9 \cdot 10^{-26}}{1.46 \cdot 10^6 \text{ eV} \cdot \frac{10^{-19}}{\text{eV}}} \\ = 8.51 \times 10^{-13} \text{ m} = 0.85 \text{ pm}$$

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。

^3H 三重水素(トリチウム) の場合

水素の同位体である ^3H 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 $12.33 \text{ y} = 3.89 \times 10^8 \text{ s}$ 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っていました。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 個含まれる割合です。

宇宙線によって生じた ^3H は、先に述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、 1ℓ の水は 0.12 Bq の放射能を持ちます。これまでこの濃度が保たれてきました。

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たどっています。

現在では 1ℓ の水中のトリチウムの濃度が一桁上昇し、 $1 \sim 3 \text{ Bq}$ になっています。この 60 年間に、地球全体の海の水が $1 \sim 3 \text{ Bq} \ell^{-1}$ 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 $1.4 \times 10^{21} \ell$ とすると、この間に放出したトリチウム放射能の総量は、 $(2 \sim 5) \times 10^{21} \text{ Bq}$ です。これからどうなるのでしょうか。

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のでしょうか。しかも、管理する廃棄物の中には、トリチウムは含まれません。海に流すことが前提です。このまま続くと、海水のトリチウム濃度はどこまでも増加するばかりです。心配です。

^{14}C 炭素 14 の場合

天然に存在する炭素の同位体、炭素 ^{14}C は考古学的年代測定に使われます。

放射性炭素 ^{14}C は、宇宙線によって大気上層部で生成された中性子が、窒素原子核と衝突して、二次的に作られます。生成された ^{14}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}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}C の濃度を反映しています。

放射性炭素 ^{14}C は、半減期が $5730 \text{ y} =$

1.8×10^{11} 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ります。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}C 濃度の違いはありません。また、植物の種類による ^{14}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}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}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}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}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)

^{14}C 年代測定データによって、その考古学的事件が、今から何年前のできごとかを、驚異的な正確さで、知ることができるようになりました。このことは、過去に行われた ^{14}C 年代測定データを使っても、その測定が行われた時が分れば、その事件が、今から何年前のできごとかを、知ることができるようになりました。

福井県若狭三方五湖の水月湖畔に、博物館があります。是非訪問して、この奇跡のデータを鑑賞し、感動してください。

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 [$\text{Sv} = \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$]

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、核分裂片などのうち、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 にかけて算して使います。

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 [$\text{グレイ Gy} = \text{Jkg}^{-1}$] 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。

$$H[\text{Sv}] = W_R D_R[\text{Gy}]$$

放射線等価線量 H の単位は、シーベルト $\text{Sv} = \text{Jkg}^{-1}$ で、組み立て単位は、グレイ $\text{Gy} = \text{Jkg}^{-1}$ 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-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

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 以内に立ち上がった人に原爆手帳が与えられる
100	人間の健康に確定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。

（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

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(10⁸)人ですから、全部の日本人が5年間で1 kg 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。

第 III 章 原子と原子核 演習問題

[問題 III, 1] 原子の素顔について、教科書「III-1」「III-2」を読んで以下の問題に答えよ。

問題 III, 1-1. 宇宙にある全てのものは、原子と呼ばれる粒子でできている。その原子1個の大きさはおよそいくらか、単位を m で答えよ。

問題 III, 1-2. 地球の人口の総数を70億人として、この数だけの原子を一行に並べると、長さはいくらになるか、m で答えよ。

問題 III, 1-3. 原子1個の質量はおよそいくらか、単位を kg で答えよ。

問題 III, 1-4. 質量（体重）が50kgの人は、およそいくつの原子からできているか、おおよその個数を答えよ。

問題 III, 1-5. 原子は原子核と電子で構成されていると言える。原子の模型を図に描き、図に原子核と電子を記入せよ。

問題 III, 1-6. 原子核の主な構成要素は何か、答えよ。

[問題 III, 2] 自然に存在する（人工の原子を含まない）原子は92種類の元素に分類できる。元素には、質量の大きさの順に番号が与えられている。その番号は原子番号と呼ばれている。（原子番号は、本来、元素に順につけられた番号であるが、一般に原子番号と呼ばれて広く使われている。）この教科書では原子(元素)番号とした。自然に存在する元素は、1番から92番までである。教科書第III章の中の、図表 III-1、図表 III-2 を参照して、以下の問題に答えよ。

問題 III, 2-1. 質量の小さい元素を、小さい順に20個、元素の名称を日本語で列記せよ。

問題 III, 2-2. 質量の比較的大きい、原子(元素)番号60以上92までの元素のうち、耳にしたことのある元素を10個選んで、その元素の名称を、質量の小さい順に列記せよ。

[問題 III, 3] 各自与えられた元素の、安定な原子および原子核について、図表 III-1、図表 III-2 を参考にして次の問題に答えよ。

問題 III, 3-1. 原子(元素)番号を記述せよ。

問題 III, 3-2. 元素名を日本語または英語で記述せよ。

問題 III, 3-3. この原子の持つ陽子の数を答えよ。

問題 III, 3-4. この原子が保有する電子の数（電氣的に中性で）を答えよ。

問題 III, 3-5. 同位体（同位元素）とは何か、説明せよ。

問題 III, 3-6. この元素の同位体を2つ選んで、その原子核を

$$\begin{array}{c} \text{質量数} \\ \text{原子(元素)番号} \end{array} \text{元素記号} \quad \text{の形で記述せよ。}$$

問題 III, 3-7. 選んだ2つの同位体の、原子核中の中性子の数を、それぞれ答えよ。

問題 III, 3-8. この元素の同位体の中で、存在度のもっとも高い原子の原子核を、

$$\begin{array}{c} \text{質量数} \\ \text{原子(元素)番号} \end{array} \text{元素記号} \quad \text{の形で記述せよ。}$$

問題 III, 3-9. 前問題で選んだ原子核を持つ原子の、質量欠損を原子質量単位[u]で計算しよう。この時、どのような手順で計算するか、その方法を述べよ。

問題 III, 3-10. ここで、数値を当てはめ計算を実行せよ。
この時、原子質量の実測値は、図表 III-2 の第4列の数値を、
陽子および中性子の静止質量は、図表 III-9 の第5列の数値を使用せよ。

[問題 III, 4] 以下に示す不安定な放射性同位体が、 $1 \mu\text{g}$ ($= 1 \times 10^{-9} \text{ kg}$) あるとする。それぞれの場合、放射能は何ベクレルか計算せよ。ここで、原子量は各元素の値（図表 III-2 第8列）を使用せよ。

問題 III, 4-1. 半減期が 8.02 日 の放射性ヨウ素 I 131

問題 III, 4-2. 半減期が 30.07 年 の放射性セシウム Cs 137

問題 III, 4-3. 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 24110 年 のプルトニウム Pu 239

問題 III, 4-4. 半減期が 7.038 億年 の放射性ウラン 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 $1 \mu\text{g}$ 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 式 (III-5) を使って、 λ と N の積を求める
- ⑥ 求めた値に、単位ベクレルをつけて解答とする

[問題 III, 5] 地球上に天然に存在する放射性同位元素 カリウム 40 ($^{40}_{19}\text{K}$) は、存在度 1.18×10^{-4} 半減期 $1.25 \times 10^9 \text{ y}$ である。一般に、質量 60 kg の成人一人の体の中に、およそ 120 g のカリウム原子が存在するとして、この人が体内に持つカリウム 40 ($^{40}_{19}\text{K}$) による放射能は、何ベクレルか計算してみよう。以下の問題に答えよ。

[解き方のヒントと順序]

- 問題 III, 5-1. 質量 60 kg の成人一人の体内にある K 原子のモル数を計算せよ。ここで、K の原子量として $39.1 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ を使うこと。
- 問題 III, 5-2. アボガドロ数 N_A を 6.0×10^{23} 個として、質量 60 kg の成人一人の体内にある K 原子の原子数を計算せよ。
- 問題 III, 5-3. 自然界における放射性カリウム 40 の存在度 1.18×10^{-4} を使って、体内にある放射性カリウム 40 の原子総数 N [個] を計算せよ。
- 問題 III, 5-4. 半減期 $1.25 \times 10^9 \text{ y}$ を秒数に換算せよ。
- 問題 III, 5-5. 本文の式 (III-6) を使って、崩壊確率 λ を計算せよ。
- 問題 III, 5-6. 本文の式 (III-5) の右辺、 λ と N の積を求めよ。
この値が、体内の放射性 K の放射能であり、単位はベクレルである

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つの節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一つありません。

この章で最終目標としたのは、**地球表面の温暖化**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。今後どのようなことになるか心配です。

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、空気中の**二酸化炭素濃度**が増加していることに気がつくまで、100 年以上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 年以上の日時が経過しました。

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。何代か世代交替の後には、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。放置したまま環境が、生物の都合に合わせてくれるはずはありません。その証拠に、氷河期には多くの生物が絶滅しました。

坂道を転がり落ち始めたボールのように、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 K) になっています。一方、裸の金星の温度は、-48℃ (273 - 48 = 225 K) と計算されています。

金星表面の大気による温暖化効果がなければ、金星の表面温度は、-48℃ です。金星はその大気が二酸化炭素のために、500℃ 以上の温暖化状態にあります。

「温暖化」という言葉は、「良いことでありがたい」という印象を与えます。しかしこれは、正確に把握するための適切な言葉であるとは言えません。

英語では、

Global Warming of the Earth Surface

と表現されています。日本語に翻訳すると、

**全地球規模で観測される
地球表面の気温上昇**

であり、正確に翻訳することが重要であることを物語っています。

人類、否、現在地球上に生息するすべての生物(動物・植物)にとって、厳しい時代が到来することを恐れています。

A. 大気

A 1. 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、その温度や圧力は、地表からの**高度（海拔）**とともに下がります。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（海拔）、気温、気圧、気温変化の概要を、**表 A 1**にまとめました。

この節で言う気温や気圧は、平均したもので、地球全域での年間の平均値です。

図 A 1には**地球大気の垂直構造**を図で示しました。高度に伴う、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、分類された各層の呼び名である**圏の名称**などを示します。

この**図 A 1**の縦軸は**高度**であり、左端と中央に km で表し、**対数**で目盛りしました。したがって、図の最下端は高度 1 km (1000 m)です。注意してください。

図 A 1左側のグラフは、**気温と気圧**の高度による変化です。気温は絶対温度 [K] で表し、図の上端横軸に目盛りしました。海拔 1 km での気温は 281.7 K (8.5℃)であり、海拔 0 m での気温は 288.2 K (15.0℃)です。

気圧は hPa で示し、図の下端横軸に対数で目盛りしました。海拔 1 km での気圧は、899 hPa であり、海拔 0 m での気圧は 1013 hPa です。

図 A 1中央のグラフには、**大気**の成分とその容積比を示します。容積比は最下端横軸に、%で目盛りしました。大部分が窒素 N₂ 気体と酸素 O₂ 気体であり、そのおおよその容積比は、4 : 1 です。

図 A 1右側に各高度の層の呼び名、**圏の名称**を示します。また、各層のおよその境界を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。

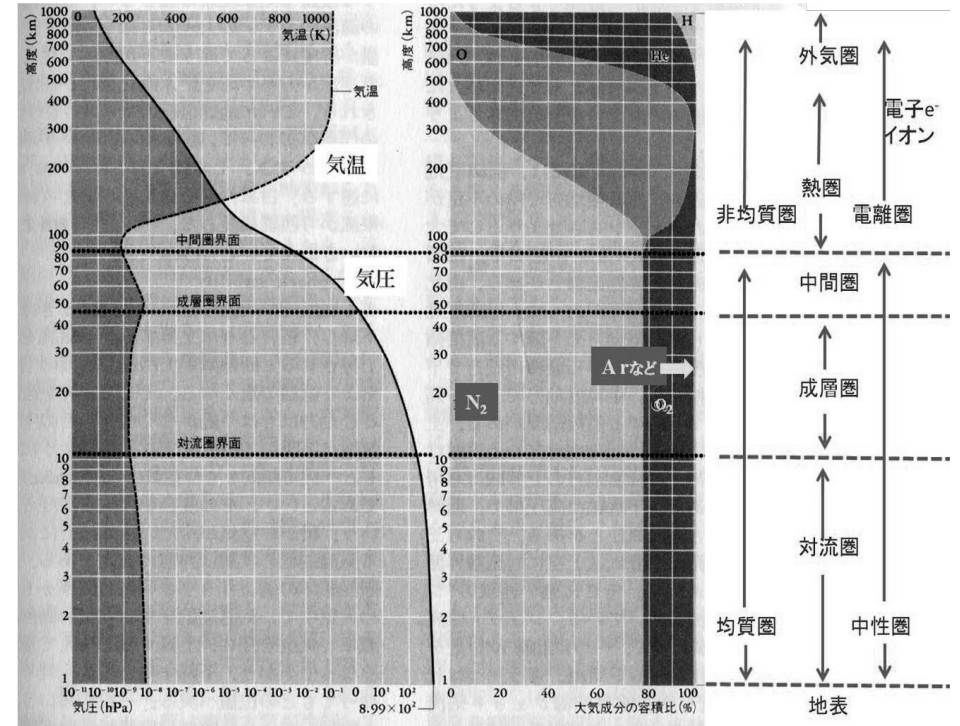


図 A 1. 大気の垂直構造 (気象の事典 平凡社より)
 (左) 気温と気圧、(中) 大気**の成分**、(右) 大気**の層分類**の名称

表 A 1. 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

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。

均質圏では、大気を構成する気体は、**電**氣的**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。

A 2. 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が、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、地表付近に集まるはずですが、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が、油が水に浮くのと似たような現象が起こるはずですが。

しかし、そのようなことになるのは、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 N₂ 78.09 % (図 A 1 中央薄灰色)
2. 酸素ガス O₂ 20.95 % (図 A 1 中央濃灰色)
3. アルゴンガス Ar 0.93 %
4. 二酸化炭素 CO₂ 0.03 % (0.04%)

A 3. 対流圏

対流圏はわれわれの生活の場です。高度がおおよそ 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

() 内は 2020 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** [g・mol⁻¹]を計算すると、

$$M_A = \{ \text{分子量または原子量} \times \text{容積比} \} \text{の和}$$

$$= 28.01 \cdot 0.7809 + 32.00 \cdot 0.2095 + 39.95 \cdot 0.0093 + 44.01 \cdot 0.0004$$

$$= 21.873 + 6.704 + 0.372 + 0.018$$

$$= 28.97 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$$

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。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。

で下がります。平均気温は、15°C(288 K)から -56°C(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 A 1 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、重力がかかり、圧力が高くなります。その結果、圧力は地表面で最も高くなります。

前に述べた通り、図 A 1 の高度は対数目盛のため、図の最下端は海拔 0 km ではなく、高度 1 km であることに注意してください。地表での大気圧は 1013 hPa です。

対流圏での**高度と平均気温、平均気圧**は以下の表の通りです。

高度	平均気温	平均気圧
0 km	15.0°C(288.2 K)	1013 hPa
1 km	8.5°C(281.7 K)	899 hPa
2 km	2.0°C(275.2 K)	795 hPa
3 km	- 4.5°C(268.7 K)	701 hPa
4 km	- 11.0°C(262.2 K)	617 hPa
5 km	- 17.5°C(255.7 K)	540 hPa
6 km	- 24.0°C(249.2 K)	472 hPa
7 km	- 30.5°C(242.7 K)	411 hPa
8 km	- 37.0°C(236.2 K)	357 hPa
9 km	- 43.5°C(229.7 K)	308 hPa
10 km	- 49.9°C(223.3 K)	265 hPa
11 km	- 56.4°C(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°C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 A 1**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°C(288 K)です。

一方、地球表面の**本来あるべき温度は、-18°C(255 K)**です。実際は 33°C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、**地球規模**での、**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** の F 5 で計算します。

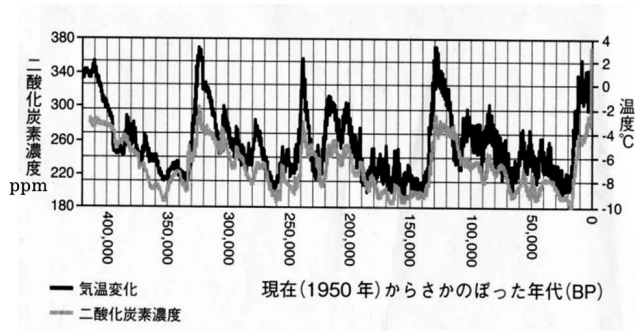
b. 大気中の**二酸化炭素 CO₂**が増加しています。大気中の**二酸化炭素の濃度**は、18

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、10⁶ 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 10²、billion は 10 億 10⁹ 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しました。

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。過去の周期的な CO₂ 濃度の増減の理由は分かっています。



図A2. 南極大陸ヴァー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)

西暦 1700 年以降の CO₂ 濃度の測定値を表にしました。左から縦に西暦年、CO₂ 濃度(ppm)、100 年前との差、同様に 50 年、10 年、5 年前との差を示しました。最近 30 年での増加が著しいことがわかります。

西暦	濃度 ppm	各年前との差 ppm			
		100 年	50 年	10 年	5 年
1700 年	280				
1800 年	285	5	(2.5)	(0.5)	(0.25)
1900 年	295	10	(5)	(1)	(0.5)
1950 年	315	20	(4)	(2)	
1990 年	357				
1995 年	364				7
2000 年	373	78	58	16	9
2005 年	383			19	10
2010 年	394			21	11
2015 年	403			20	9
2020 年	416			22	13

()内は、その間の平均値

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(北緯 39 度、東経 142 度)における観測値です。

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。

温暖化この言葉はわれわれにより印象を与える言葉です。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。

大気中の二酸化炭素 CO₂ 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。

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。

A 4. 成層圏

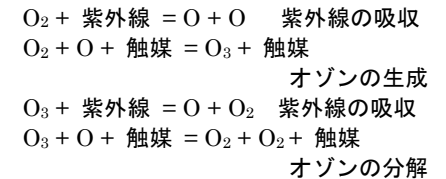
成層圏では、対流圏の温度の低下が終わりに、温度が横這いから上昇に転じます。成層圏は大気の乱れがなく、安定しています。このことを利用して、その下端部分が、ジェット機の飛行に使われています。気圧が低いので空気抵抗が少なく、飛行機の燃料も少なく済みます。1 万から 2 万メートル上空を飛行しますから、騒音は、飛行場の近辺だけに限られます。

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 付近に、オゾン層と呼ばれるオゾン O₃ の濃度が濃くなる部分が形成されています。その濃度は 1 ~ 10 ppm です。

オゾン層では、酸素からオゾン O₃ が生成され、同時にオゾン O₃ 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。



オゾンの生成および分解に寄与する触媒は、酸素(O₂)や窒素(N₂)と言われている。

この反応によるオゾン O₃ 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 O₃ 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 O₃ の濃度と分布は、実測値とよく一致しています。

オゾン O₃ 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 O₃ 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。

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です。

ところが最近 50 年の観測では、オゾン
層のオゾン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 NO₂
- ・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 CFCl₃、
CF₂Cl₂ などのフロン系の気体

これらの気体が、オゾン O₃ 分解の触媒
となり、オゾン層を破壊してしまい、最近
では、波長が 200~320 nm の紫外線が、
オゾン層で吸収されず、地球表面に届くよ
うになってしまいました。

A 5. 気体の一般的な性質 —ボイル・シャルの法則・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か。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°C 上昇する毎に、0°C の体積の 1/273 だけ
増加します。1787 年に発見されたシャル
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、

$$PV = nRT \quad (A1)$$

$$V_t = V_0 \left(\frac{273+t}{273} \right)$$

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、

$$V_T = \frac{V_0}{273} T \quad (A3)$$

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
はどの気体にもほぼ当てはまります。気体
によって少し違いはありますが、まずは問
題にする必要はありません。

また、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 127) 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 本の黒色曲線です。それぞれ
が式(A1)の温度 T を決めて、縦軸圧力と横
軸体積の関係をグラフにしたものです。

温度は、-10~40°C (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

ここで P は圧力で単位は Pa、 V は体積
で単位は m³、 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 J·mol⁻¹·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、アボガドロ数 6.02×10²³
個の水素原子のことです。原子量について
は、III-5 (頁 76) を、また、それぞれの
値は、図表 III-2 (頁 69-76) を参照し
てください。

酸素分子 1 mol とは、酸素の分子量は
32.00 ですから、酸素 32.00 g (0.03200 kg)
のことです。分子の数でいうと、アボガドロ
数 6.02×10²³ 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

$$PV = \text{一定値} \quad (A2) \text{ です。}$$

次に、**e.** の記述をそのまま式にすると

$$\begin{aligned} & \text{温度 } t[\text{°C}] \text{ の気体の体積} \\ & = 0\text{°C} \text{ の気体の体積} \\ & \quad \times \left(1 + \frac{t[\text{°C}]}{273} \right) \end{aligned}$$

となります。温度が、0°C の時の気体の体積
を V_0 、温度 $t[\text{°C}]$ の時の体積を V_t とし、さら
に、分数を通分すると、

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) で目盛りしました。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, $0^\circ\text{C}=273\text{K}$) では、1 モルの気体の体積は 22.4ℓ

A 6. 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。

しかししたいの場合、図 A3 の同じ黒色曲線上にはありません。同じ曲線上に乗るのは、変化に際して熱が自由に入ったり出て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がります。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がります。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、

です。図の $T = 273\text{K}$ 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。

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。

$$PV^\gamma = \text{一定値} \quad (\text{A4})$$

又は

$$TV^{\gamma-1} = \text{一定値} \quad (\text{A4}')$$

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： $\gamma=1.66$
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： $\gamma=1.40$
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： $\gamma=1.33$
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 127)。青色、赤色、緑色の曲線は、断熱変化の式

$$PV^\gamma = \text{一定値} \quad (\text{A4})$$

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。大気的主要成分は、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には、

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°C 低い式 (A1) の黒色曲線に交わります。つまり、温度が 10°C だけ下がることが分かります。

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°C ではなく、 6.5°C 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 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°C 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°C だけ上昇するわけです。

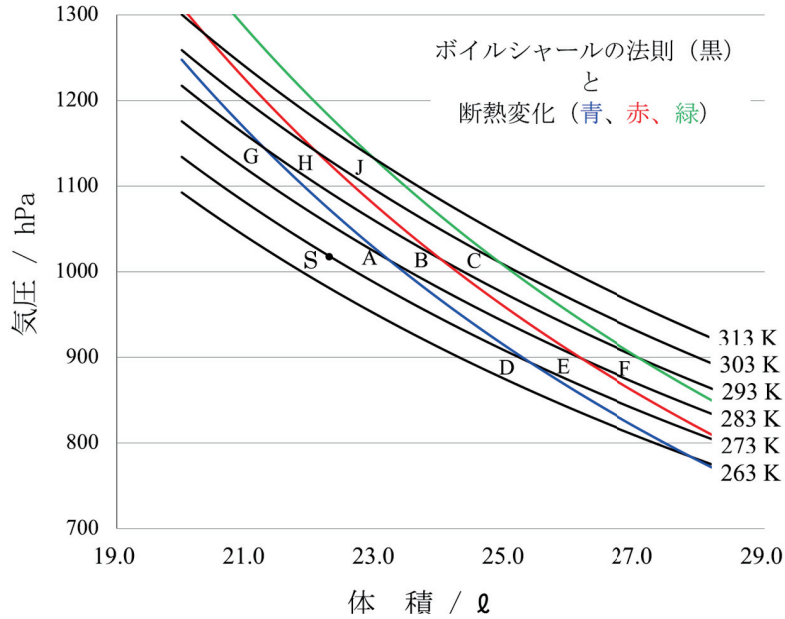


図 A3. 気体の圧力・体積・温度の関係

A 7. 熱による物質の状態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°C 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。

これがすべてであり、第 2 と第 3 では、熱が物体の内部に蓄積されます。第 2 の温

度上昇は物質の熱容量で決まり、第 3 の熱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。いつでも、どんな物体にも当てはまります。式にしておきます。

$$\begin{aligned} & \text{外から加えられた熱エネルギー} \\ & = \text{物体の体積の増加に使うエネルギー} \\ & \quad + \text{物体中に貯えたエネルギー} \quad (A5) \end{aligned}$$

体積の増加は、外からおさえられる圧力を逆らって大きくなると考え、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。

A 8. 空気中の水蒸気

空気中には水蒸気が含まれています。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、水蒸気は空気中に混ざり込みます。この値を飽和水蒸気圧と呼びます。

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。

$$\begin{aligned} P[\text{Nm}^{-2}]\Delta V[\text{m}^3] &= P\Delta V[\text{Nm}^{-2}][\text{m}^3] \\ &= P\Delta V[\text{Nm}] = P\Delta V[\text{J}] \end{aligned}$$

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い、しかも、外からエネルギーをもらえないことが理由です。自分の貯蓄を吐き出し、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の貯えにまわし、温度が上がると考えてよいでしょう。

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 A 4 と表 A 2 に示しました。

図 A 4 の縦軸には飽和水蒸気圧を hPa で目盛り、横軸には温度を°C で目盛りしました。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。

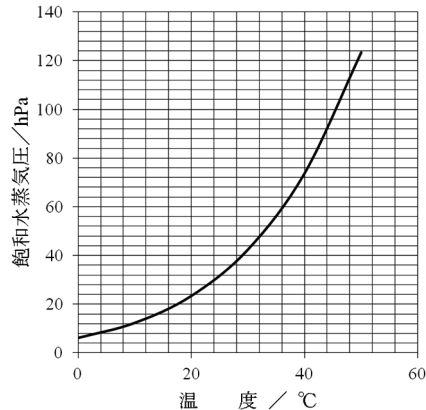


図 A 4. 飽和水蒸気圧の温度変化

飽和水蒸気圧を表 A 2 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 A 2 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 が乾燥空気の圧力です。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 が乾燥空気の圧力となります。

表 A 2 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です。

湿度 100% の最下端の数値 0.580 kgm^{-3} は 100℃ の水蒸気の密度です。

表 A 2. 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}		
°C	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

図 A 4 や表 A 2 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は、温度が決まると水蒸気の圧力がきまり、水の蒸気圧と呼ばれます。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。

第 V 章 実験 10 に、アルコール温度計が 2 本でできた、乾湿湿度計の写真を示します。参考にしてください。

A 9. 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 A 5、A 6、A 7 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、A 8 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がります。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、水蒸気の水や氷になります。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せう。次のことだけ頭に入れておいて下さい。

水蒸気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比べると非常に大きく、水蒸気 1 kg 当たり 540 kcal ($540 \times 4.19 = 2263 \text{ kJ}$) 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。

A 10. 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。A 3を見てください。ここに挙げたように、対流圏では、海拔が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、A 6で述べた断熱膨張によるものです。

図A 3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は海拔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。海拔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、A 9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、水蒸気や水滴は水滴になってしまい、凝固熱も同時に放出します。

海拔が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せん。その後、山を下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A 3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℃しか温度は下がら

んが、下り坂では水蒸気はなくなり、凝縮熱、凝固熱には関係がなくなります。ですから、図A 3の青線、赤線、緑線の通りに変化します、どの場合にも温度が約10℃上昇します。

登り始めと比較すると3.5℃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せん。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が。温度の上昇し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。

A 1 1. 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A 5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A 5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。

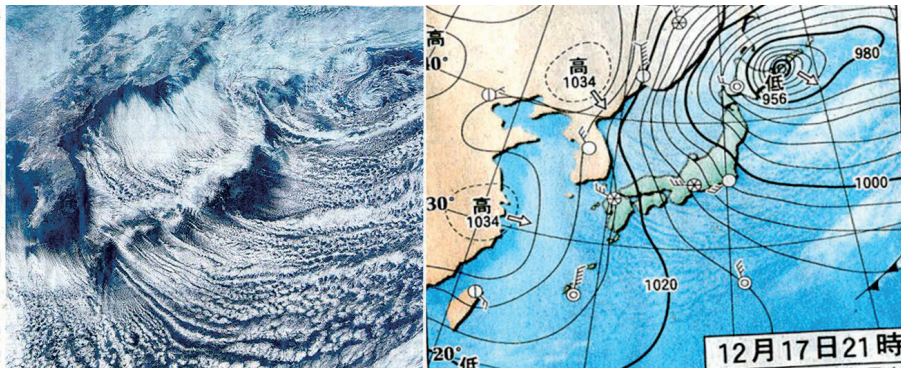
大気は中国大陸の高気圧から押し出さ

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(頁54)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。

風の様子を図A 5左に示しました。この図A 5左は、気象衛星から送られてきた雲の流れの写真です。図A 5右の気圧配置とほぼ同時刻の雲の流れです。図A 5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、北風が吹きます。コリオリの力によります。



図A 5. 冬の日本の気圧配置(右)と雲の流れ(左)

A 1 2. 台風

台風の左巻きの原因もA 1 1と同じコリオリの力です。強い低気圧に周囲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、台風の中心のまわりでは風が、左巻にぐるぐる回ります。

ここでも、台風のまわ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。赤道近くの大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(しわざ)です。

台風の画像の一例を図A 6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。台風の日と呼ばれています。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。

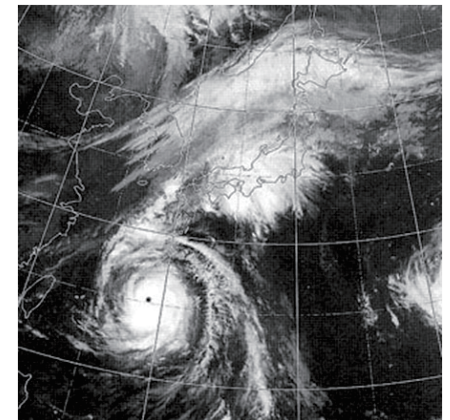
台風は高気圧の周りの風に乗って北方に進みます。日本列島に近づくと、偏西風の

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。

進路を東に変える原因は偏西風です。地球を全体的に見ると、日本列島のある北緯40度付近にはどこでも、かなり強い西風が吹いています。この風を偏西風と呼びます。日本の天気はおおよそ西から東に移って行くのもこのためです。

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斜めに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。



図A 6. 台風の映像

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、呼びます。その頃、日本全体が大きな被害を受けます。

その後、太平洋高気圧がさらに弱まると、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。秋になります。

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、風の被害はさほど大きくはありません。

理由は、台風が偏西風に乗ってスピードが速まることと、台風自身のまわりに左巻の風が吹くことです。これらが合わさって、台風のまわりの風は、南側では、加算になりますが、北側では引き算になります。

台風が時速 36 km/h とすると、秒速 10 m/s の風に相当します。本来の台風のまわりに吹く風に、この値を加える部分と引き算の部分ができるからです。

夏の台風が日本海の沿岸近くを通過する時は、日本列島にかなり大きな被害が出ます。太平洋南岸沿いに進む台風はさほど大きな被害を与えません。

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、農作物の豊穰が約束されます。1年を通してみると、なくてはならないものというものの、豪雨で、河川の氾濫による田畑の冠水はいただけません。

最近 30 年を振り返ると、台風のようにずいぶん変わってきました。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、降雨量が極端に増大しているなどです。

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。

台風の大型化によって、これまでの局所的な被害ではなく、広い地域が同時に被害を受けるようになりました。

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、南の高気圧が弱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。これは全く例のない台風でした。

地球の温暖化による異常気候が原因のようです。さまざまな効果が、重なり合い、非常に荒っぽく、露わに我々の前に現れるように見えます。

第 IV 章 A. 大気 練習問題

[問題 IVA, 1] 地球の大気について、教科書「IVA 1」「IVA 2」を読んで、以下の問題に答えよ。

問題 IVA, 1-1. 地球の大気は、気体の混合物でできている。海拔約 8.7 万 m (87 km) までの大気は、均質圏と呼ばれ、その組成が海拔に無関係に一樣である。つまり、質量の大きい重い気体が、地表近くに集まったり、軽い気体が上に登って上空に溜まることがない。その理由を想像してみよ。

問題 IVA, 1-2. この均質圏に存在する気体の種類と、各気体の体積組成を、成分の多い順に 4 つ列挙せよ。

[問題 IVA, 2] 海拔約 1.1 万 m (11 km) までの大気は、対流圏と呼ばれている。我々の周りの気象現象が起こる領域である。この対流圏について、教科書「IVA 3」を読んで以下の問題に答えよ。

問題 IVA, 2-1. 対流圏には、対流圏にしか含まれない重要な気体が 1 つある。その気体の名称を答えよ。

問題 IVA, 2-2. この気体が対流圏にしか存在しない理由は何か、想像して答えよ。

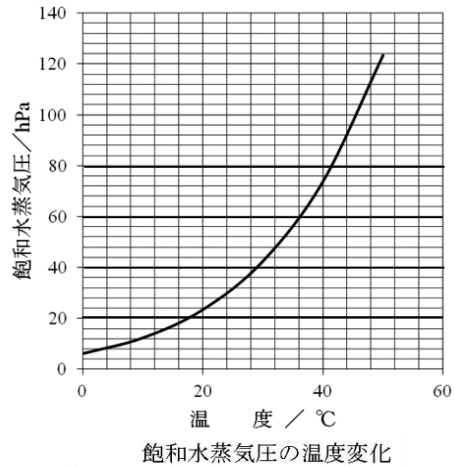
問題 IVA, 2-3. 地球表面(海拔 0 m)での平均気温は 15°Cである。この温度を絶対温度 [K] で表すといくらか。

問題 IVA, 2-4. 対流圏では、海拔が 1000 m (1km) 増加する毎に、気温が、6.5 °Cだけ低下する。富士山頂の海拔は、3776 m (3.776 km) である。富士山頂の平均気温は何度か、小数第 1 位まで求めよ、単位を°Cおよび絶対温度 [K] で答えよ。

問題 IVA, 2-5. 地球表面 (海拔 0 m) の平均大気圧は、1 気圧である。この圧力を単位 ヘクトパスカル [hPa] でいうといくらか、また、この圧力を単位 トル [Torr] でいうといくらか。

問題 IVA, 2-6. 大気圧は、海拔の増加と共に減少する。その理由は何か想像せよ。

[問題 IVA, 3] 大気に含まれる水蒸気量は、水蒸気の分圧によって表される。水蒸気分圧とは、水蒸気その水蒸気だけで全体積を占有した時の圧力のことである。大気に含まれる水蒸気量(分圧)は、温度によって変化する。大気中に含まれ得る水蒸気圧の最大値は、飽和水蒸気圧と呼ばれ、右図のグラフのように、温度の増加と共に増加する。この図は、大気が1気圧(1013 hPa)の時の飽和水蒸気圧であり、温度とともに増加する様子が示されている。教科書「IVA8」を読んで以下の問題に答えよ。



- 問題 IVA, 3-1. 温度 20°C の時の飽和水蒸気圧はいくらか、グラフから読み取れ。
単位を [hPa] で答えよ。
- 問題 IVA, 3-2. 温度 40°C の時の飽和水蒸気圧はいくらか、グラフから読み取れ。
単位を [hPa] で答えよ。
- 問題 IVA, 3-3. 気温が 20°C から 40°C まで上昇すると、飽和状態でおよそ何倍の水蒸気が大気に含まれるか。
- 問題 IVA, 3-4. 気温が上昇すると、雨の降り方が激しくなる、その理由を想像せよ。

[問題 IVA, 4] 海拔が約 1.1 万 m (11 km) から約 4.7 万 m (47 km) までの間の大気は、成層圏と呼ばれる。成層圏について、教科書「IVA4」を読んで以下の問題に答えよ。

- 問題 IVA, 4-1. 成層圏には、オゾンが比較的多い領域が存在し、オゾン層と呼ばれている。オゾン分子の化学記号を答えよ。
- 問題 IVA, 4-2. オゾン層におけるオゾンの濃度を 5 ppm (parts per million) 、大気圧を 20 hPa とし、この領域の大気 22.4 リットル中のオゾン分子の数を求めよ。
- 問題 IVA, 4-3. オゾン層は、太陽からの光に対して、どのような働きがあると言われていたか。説明せよ。
- 問題 IVA, 4-4. その結果、オゾン層が地球表面の生物に、どのような影響を与えるか述べよ。

[問題 IVA, 5] 「理想気体の状態方程式」は、別名「ボイル・シャルルの法則」と呼ばれる。この方程式あるいは法則の内容は次の通りである。
「気体の圧力 P 、体積 V 、温度 T の間には、気体の種類に関係なく、一つの決まった関係がある」
この関係は、全ての気体に対して、近似的ではあるが当てはまる。教科書「IVA5」を読んで、以下の問題に答えよ。

- 問題 IVA, 5-1. 気体 n モルに対する「理想気体の状態方程式」を、式で示せ。
ここで圧力を P 、体積を V 、絶対温度を T で表し、比例定数を R とせよ。
- 問題 IVA, 5-2. 「ボイルの法則」を言葉で記述せよ。
- 問題 IVA, 5-3. 「ボイルの法則」は、どのような条件で成り立つか、「理想気体の状態方程式」を使って説明せよ。
- 問題 IVA, 5-4. 「シャルルの法則」を言葉で記述せよ。
- 問題 IVA, 5-5. 「シャルルの法則」は、どのような条件で成り立つか、「理想気体の状態方程式」を使って説明せよ。

温度が 0°C (= 273 K)、圧力が 1 [気圧 atom] (= 101300 Pa = 760 Torr) の時、1 モル ($n = 1$) の気体の体積は、22.4 リットル (= 0.0224 m³) である。
このことを利用して、以下の問題に答えよ。

- 問題 IVA, 5-6. 圧力の単位を Pa パスカル、体積の単位を m³、絶対温度の単位を K とて、比例定数 R の値を求めよ。
- 問題 IVA, 5-7. 圧力の単位を気圧 atom、体積の単位をリットル、絶対温度の単位を K とて、比例定数 R の値を求めよ。

B. 水

B 1. 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せん。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 B 1 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。

紛らわしさをさけるため、今後、液体の水を **Water** とします。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。

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 °C と 100 °C を、細い破線で示しました。

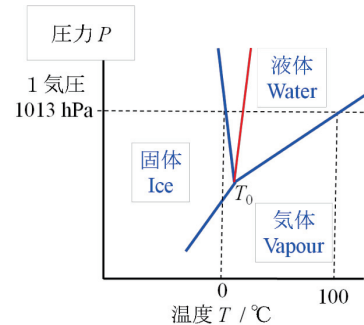


図 B 1. 青線: H_2O の $P-T$ 状態図の模式図

縦軸の値が 1013 hPa (1 気圧) の時を考えます。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、よく知られた水の**融点**、0°C (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、水の**沸点** 100°C (373 K) です。

このようにわれわれは、 H_2O 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。

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°C (1084 + 273 = 1357 K)で、**沸点**すなわち**凝縮温度**は 2571°C (2844 K)です。

鉄の場合には 1 気圧で**融点・凝固温度**は、1536°C (1809 K)で、**沸点・凝縮温度**は 2863°C (3136 K)です。

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**と言います。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わります。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も変わります。図 B 1 の下方の青色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。

H_2O の $P-T$ 状態図 (図 B 1) に戻しましょう。 H_2O の**融点**は 1 気圧で、0°C (273 K) です。**凝固温度**と同じ値です。 H_2O の**沸点**は 1 気圧で、100°C (373 K)です。**凝縮温度**と同じ値です。

この図で、固体と液体の**青色境界線**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。**Ice** に圧力が加われば **Water** になることを意味しています。これは H_2O だけが持つ特徴です。

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 本の刃ですから、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、他の物質では見られません。図 B 1 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右上がりの赤線です。

池や海の底は、水圧が掛かって圧力が上がります。圧力が上がり、**Ice** になる温度が下がります。池や海の底は、厳冬でも凍って固体になりません。これは主に、0°C で **Water**

や Ice の密度が小さくなって浮上することによります（次節）。

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°C で Water は沸騰して蒸発します。いくら熱しても、それ以上の温度になりません。富士山頂ではごはんがうまく炊けません。これは昔のことで最近では、圧力鍋があり便利です。

図 B 1 の $P-T$ 状態図には 3 本の青色太実線が 1 点に集まる点があります。図 B 1 中の点 T_0 です。この点は三重点と呼ばれています。ここでは固体、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 273.16 K です。この圧力と温度で Ice と Water と Vapor の三態が共存します。

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 B 1 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。

図 B 1 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。

B 2. 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。

Water の密度は、1 気圧でほぼ 1 です。単位は gcm^{-3} です。Water 1 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 kgm^{-3} を使います。この SI 国際単位系では 1 m^3 の Water の質量を kg で表します。体積 1 m^3 は体積 1 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 $10^3 kgm^{-3}$ となります。

密度は、単位 kgm^{-3} を使うと、単位 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、 gcm^{-3} の値を 10³ 倍すると単位を 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 cm^3 の 1000 倍ですから、密度の単位に $kg l^{-1}$ を使うと、単位 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 B 2 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°C 以下を拡大しました。

縦軸は、密度の逆数ですから、Water 1 kg の体積を l で表しています。縦軸は Water の密度 [$kg l^{-1}$] の逆数ですから、単位は [$l kg^{-1}$] となります。

図 B 2 によると、温度が 4°C 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°C 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。

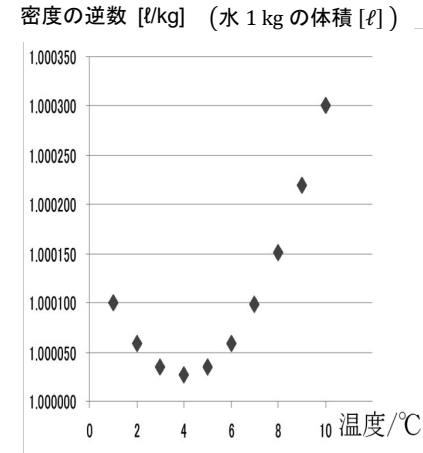


図 B 2. Water の密度の逆数と温度の関係

B 3. 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。間違っても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なる時の言葉です。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。

さらに温度が下がって、0°C 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°C 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°C 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。

融点とは、この融ける温度のことです。融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か。

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。

溶けるの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、規則正しく原子が並んで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氣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、**電氣的な引力**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、**H₂O**自身の持つ電氣的性質によって、いろいろな化合物の電氣的な引力に割り込んで、その物質の本来持つ電氣的引力を無力なものにしてしまいます。

従って化合物が、少しでも電氣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氣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。油は共有結合の代表です。「**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。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すが、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。

B 4. H₂O 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、**H₂O**の融点は0°C、沸点は100°Cです。この値を水の同族分子の値と比較してみましよう。

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**H₂O**分子の形に由来した電氣的性質によります。

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、石鹼について注意しておきましょう。石鹼は水がなければその効果はありません。石鹼分子の働きは、第1に、油を包み込んで水に溶けるイオンにすることで。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。

石鹼は繊維の隙間に**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、石鹼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。

水**H₂O**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。つまり、 H_2S 、 H_2Se 、 H_2Te です。図 B 3 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 B 3 中の印は、■：分子量 [$\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$]、▲：沸点 [$^{\circ}\text{C}$]、●：融点 [$^{\circ}\text{C}$] 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	$\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$
沸点	100	-60.7	-41	-2	$^{\circ}\text{C}$
融点	0	-85.5	-66	-49	$^{\circ}\text{C}$

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、質量が大きいくほど高くなります。 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の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、お互いに電氣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。

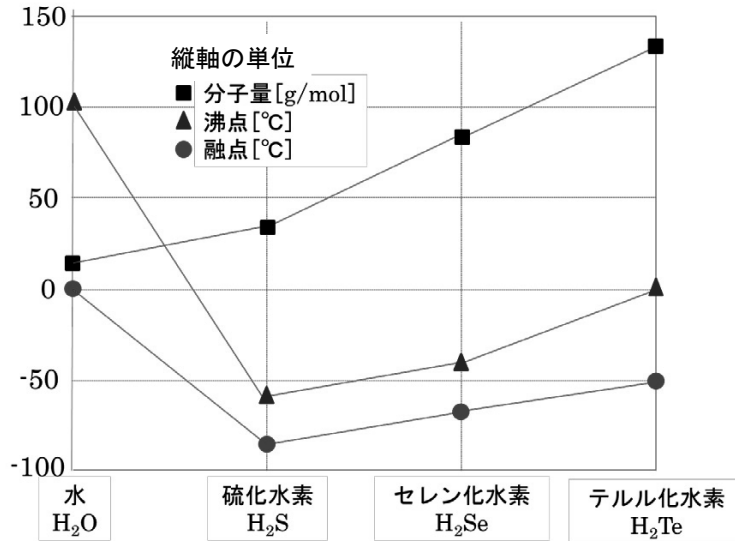


図 B 3. 水 H_2O の同族分子の沸点・融点の比較

B 5. 熱容量

第 IV 章 B 5、B 6、B 7 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°C 上げるために必要な熱エネルギーのことです。ここで、 1°C は絶対温度で 1

K 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 1 g (1 kg) を 1°C 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°C 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 B 1 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 B 1. 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	
		cal	J		cal	J
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 $\text{mol}^{-1} \text{K}^{-1}$	J $\text{mol}^{-1} \text{K}^{-1}$	g mol^{-1}	cal $\text{g}^{-1} \text{K}^{-1}$	J $\text{g}^{-1} \text{K}^{-1}$

Waterのグラム熱容量、 $1 \text{ cal g}^{-1}\text{K}^{-1}$ 、または、 $4.19 \text{ J g}^{-1}\text{K}^{-1}$ 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、 $1 \text{ kcal kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ または $4.19 \text{ kJ kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ に、すればよいのです。

この表の第3、4列目の数値に注目してください。次の二点です。

第一はWater以外の物質では、その値がほぼ等しく、 $6 \text{ cal}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ または $25 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ です。これは1モルでは、原子(分子)数が 6×10^{23} 個と、決まっているからです。

第二は、Waterはその値に比べて、飛び抜けて大きいことです。水の熱容量が大きいことは、 1°C 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°C 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

B 6. 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。

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。

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。

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1gの原子数がばらばらだからです。

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ひ、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

B 7. H₂Oの熱容量と潜熱

H₂Oの熱の貯え方を、次頁の図B 4に示しました。横軸は、温度を $^\circ\text{C}$ で目盛りしました。縦軸は、H₂O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。H₂O 1 kg当たりの貯えるエネルギーの量を示しています。

熱を加えると、H₂Oは 0°C 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、H₂O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°C でも、Iceの貯えよりWaterの貯えが大きいのです。

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°C 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°C 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。

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。同じ名前と呼ばれますが、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。

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すが、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B 4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°C 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°C 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°C でVaporになる時、図B 4の点Fから点Gへ変化します。その時、Waterは 540 kcal 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。

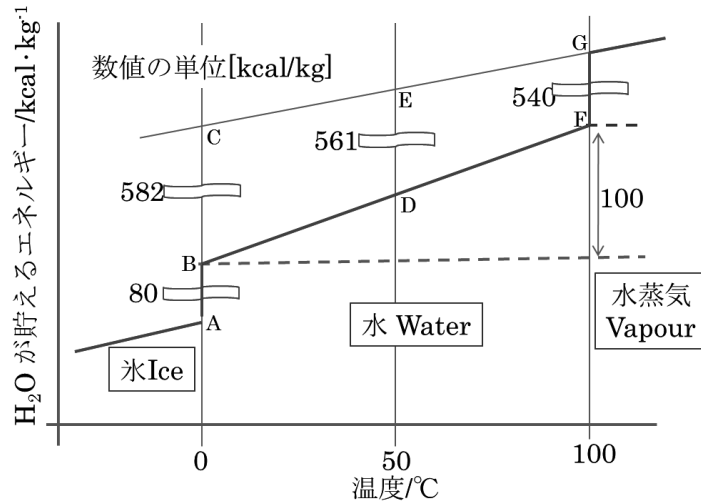


図 B4. H₂O の熱容量と潜熱

点 G の Vapor に、さらに熱を加えると温度が 100°C 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 °C 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 °C 以下でも気化熱を周りに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°C 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°C の値です。

100°C 以下の水蒸気の熱容量を、100°C 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°C 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良い、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°C 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°C 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

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、窓枠を木材にして結露を防ぐと室内の保温はずいぶんよくなります。

B8. H₂O 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。

H₂O 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 個が持つ合わせて 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 H₂O 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。

H₂O 分子の「くの字」型の模式図を、次ページの図 B5 左に示します。酸素を中心にして、両側に水素が、角(つの)のように突き出しています。

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B 5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とはいませんが、マイナス電

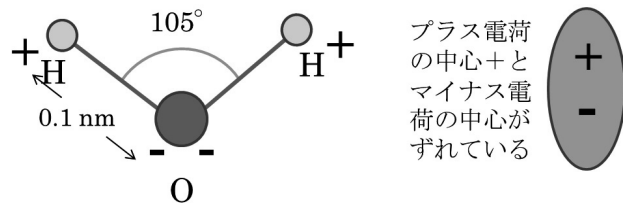


図 B 5. 水 H_2O 分子の形状(左)と電気双極子(右)

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 B 5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、このような電氣的なずれは起きません。

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 分子の形状を持つ特徴です。

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。

B 9. 水素結合

B 8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 分子同士が、電氣的に引き合います。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 分子同士が離れ難い関係をつくります。

そのようすを**図 B 6**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 \AA) 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。

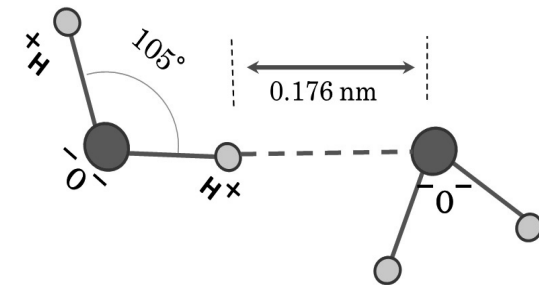


図 B 6. 二つの H_2O 分子間の水素結合

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、同族分子と比べて高くなります。

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十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。 $12 \times 12 \times 12 = 1728$ 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 分子同士が水素結合で、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。この原子や分子の運動エネルギーのことを、物理学では熱振動のエネルギーと呼びます。

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 B 7 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(大きな黒色)を引き付けます。

2 個の水素は 105 度開いていますから、引き付ける酸素はこの方向に近づきます。1 個の H_2O 分子(中央)が、2 個の H_2O 分子(上と右)を、105 度開いた方向に引き寄せます。

一方、中央の水分子の酸素原子には、左からと手前からの 2 個の水素が近づきます。この水素も別々の H_2O 分子のもので、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。

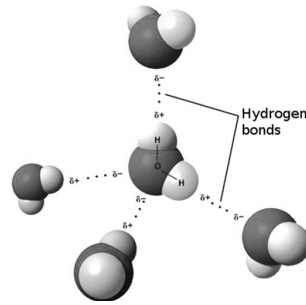


図 B 7. 複数の H_2O 分子の集まり

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 B 7 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°C 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 B 2 (頁 142) に Water 1 kg の体積の変化として示されています。

B 1 0. 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つのは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。

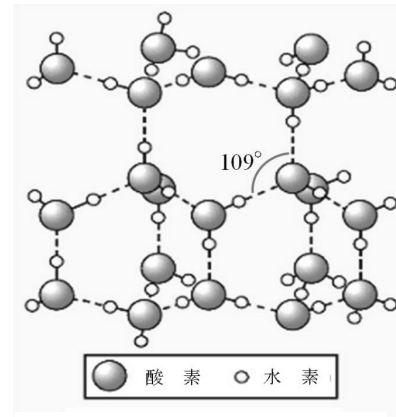


図 B 8. Ice の結晶構造

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 B 8 に示します。これは立体図です。大きな球は酸素、小さい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。

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 0.174 nm 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 自身にとって楽なのです。これが、図 B 1 (頁 139) の固体と液体の境界線が右下がりになる原因です。

[問題 IVB, 1] 地球は水の星と言われている。水は、他の物質と較べると、特異な性質を持っている。教科書「IVB 1」「IVB 2」「IVB 3」「IVB 4」「IVB 5」「IVB 6」「IVB 10」を読んで解答せよ。

問題 IVB, 1-1. 特異な性質とはどのような性質か、箇条書きにせよ。

[問題 IVB, 2] 以下の事から現象は、水のどのような特異な性質に関係するものか説明せよ。

問題 IVB, 2-1. アイススケートはよく滑る。

問題 IVB, 2-2. 氷で閉ざされた海の底や、氷の張った湖の底に、真冬でも魚が生息する。

問題 IVB, 2-3. もっとも効果的な床の掃除は、水拭きである。

問題 IVB, 2-4. 日本は海洋性気候で温和である。

問題 IVB, 2-5. 庭に打ち水をすると涼しくなる。

問題 IVB, 2-6. 寒い冬の朝、ガラス窓の内側に水滴が溜まる。

問題 IVB, 2-7. 初雪の降る日や、池に氷の張る日は、さほど寒さが厳しくない。

問題 IVB, 2-8. 蒸気でやけどをすると怪我の程度がひどくなる

問題 IVB, 2-9. 水 H₂O の固体（氷）が、水に浮く。

[問題 IVB, 3] 水 H₂O の分子について、教科書「IVB 8」を読んで、以下の問題に答えよ。

問題 IVB, 3-1. 水分子の分子式を化学記号で答えよ。

問題 IVB, 3-2. 水分子の形状で図に描け。

問題 IVB, 3-3. 水分子の形状の異常について述べよ。

[問題 IVB, 4] 下の図は、水 H₂O の熱容量と潜熱を模式的に示した図である。ここで、縦軸は、水 1 kg が貯えるエネルギーで、図中の数値の単位は $\frac{\text{kcal}}{\text{kg}} = \text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$ である。また、横軸は温度で、単位は °C である。教科書「IVB 7」を参考にして、以下の問題に答えよ。ただし、1 kcal=4.19 kJ とせよ。

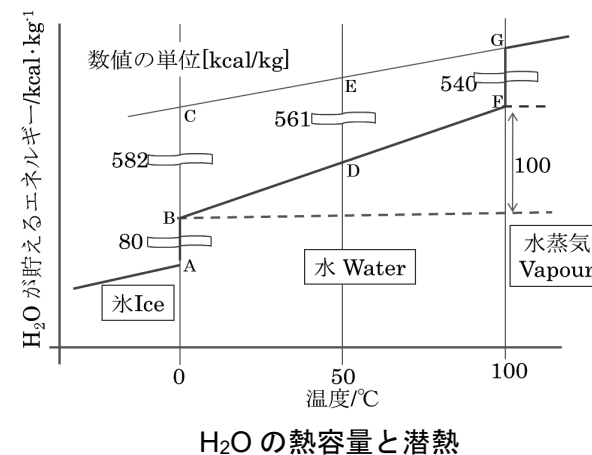
問題 IVB, 4-1. 横軸の 3 つの値は温度で、単位が °C である。この値を、それぞれ絶対温度 K で示せ。

問題 IVB, 4-2. 水 H₂O の潜熱について、数値を使って説明せよ。

問題 IVB, 4-3. 水(Water)の熱容量は、1 kg あたり何 kcal か、ただし、熱容量とは、温度を 1°C 上げるために必要なエネルギーのことである。

問題 IVB, 4-4. 前問題（問題 VB, 2-3）のエネルギーの値を、単位 kJ で言うと、およそ何 kJ か。

問題 IVB, 4-5. 温度 0 °C の氷(Ice) 1 kg を、すべて 100 °C の水蒸気(Vapour) にするために、どれだけのエネルギーが必要か、計算せよ。単位を、kcal または kJ で答えよ。



C. 熱と温度

C 1. 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だが、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** 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。

C 2. 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

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**熱の仕事当量**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、正確な数値としては定まりません。

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。そのことは、第 I 章 表 I-2 に示しました。

ジュールは同じ頃、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、**原子分子の運動エネルギー**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。ですから物理学では、このエネルギーのことを特に、**熱振動のエネルギー**と呼ぶことは前にも触れました。

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、ニュートンメートル Nm です。ここで、N は力の単位です。

で、記号 W と書き、組み立て単位は $W = Js^{-1}$ 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] = [Js⁻¹] 電磁気学と力学の接点です。

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

C 3. 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**と言います、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 B 5 **熱容量**に詳しい説明があります。

そこには表 B 1 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。

C 4. 温度

温度とはその物質の持つエネルギーの尺度とってください。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 B 6 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せん。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、下がることの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°C 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。

論理的に導かれたこの最低温度を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 $^{\circ}\text{C}$ 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**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 $^{\circ}\text{F}$ 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。

C 5. 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、最近では**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。

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。

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でしょう。特に熱を放出するものを、直接冷やすのが重要です。

一方暖房は、余り暖め過ぎない空気を、部屋の下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。

C 6. 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、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ることです。

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。電気を伝えるにくいもの、これは**絶縁体**と呼ばれますが、絶縁体はやはり熱を伝えるにくいものです。

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せん。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わけではありません。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。

絶縁体例えば木板の場合、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 C 1 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。

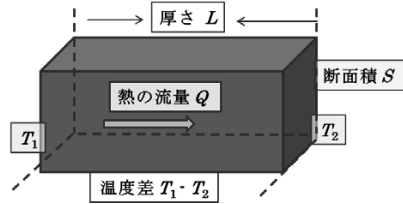


図 C 1. 熱の流れのモデル

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 ワット] は、次式で表されます。

$$\frac{Q}{S} = K(T_1 - T_2) \frac{1}{L} \quad (C1)$$

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。

さらに、 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 C 2 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、グラファイトなどの金属です。熱伝導率は大きな値で、 $200 W m^{-1} K^{-1}$ 以上です。

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 $0.2 W m^{-1} K^{-1}$ 以下で、金属の1000分の1以下です。

空気が最も熱伝導の悪い物質です。第IV章 A 1 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、流出しているか私の部屋について計算してみます。皆さんも自分の部屋の窓についても、以下を参考に、熱の流出入量を計算してください。

熱エネルギーは、アルミサッシ や 木材の枠からの流出入量 と ガラス や 紙の障子からの流出入量の和とします。

流量は式(C1)の両辺に断面積を乗じて

$$\text{流入量} = \text{熱伝導率} \times \text{温度差} \times \text{断面積} \div \text{長さ(厚さ)} \quad (C2)$$

を使って計算し、結果を次頁に示します。

アルミサッシ製の枠による熱の流入・流出が桁外れに大きいことが式 (C3) の結果から分かります。式 (C4) の木製の枠と比べてください。

ガラスの厚さの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りますが、この間がガラスで埋まっていると仮定しました。

厚さ5 mm 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。

以下は私の部屋の計算結果です。

表 C 2. 熱伝導率(熱伝導度) $[W m^{-1} K^{-1}]$

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

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 $K_A = 209 W m^{-1} K^{-1}$
 木製：木の熱伝導率 $K_W = 0.15 W m^{-1} K^{-1}$
 ガラス製：ガラスの熱伝導率 $K_G = 0.6 W m^{-1} K^{-1}$
 紙製：紙の熱伝導率 $K_P = 0.06 W m^{-1} K^{-1}$

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_{FA} とし、
 木製枠の場合： Q_{FW} とし、

ガラス部分からの流入量

ガラス窓の場合： Q_G とし、

内障子部分からの流入量

障子紙の場合： Q_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。

$$Q_{FA} = 209 (T_1 - T_2) 0.6 / 0.03 = 4200 (T_1 - T_2) [W] \quad (C3)$$

$$Q_{FW} = 0.15 (T_1 - T_2) 0.6 / 0.03 = 3.0 (T_1 - T_2) [W] \quad (C4)$$

$$Q_G = 0.6 (T_1 - T_2) 4.8 / 0.015 = 190 (T_1 - T_2) [W] \quad (C5)$$

$$Q_P = 0.06 (T_1 - T_2) 4.8 / 0.001 = 290 (T_1 - T_2) [W] \quad (C6)$$

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ぬ。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、最近で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°C 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ぬ。

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°C 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。

C 7. 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。

第IV章 C 熱と温度 練習問題

[問題 IVC, 1] 温度と熱について、教科書「IVC 1」「IVC 2」「IVC 3」および「IVC 4」を読んで以下の質問に答えよ。

問題 IVC, 1-1. 熱とは何か、教科書を読んで感想をのべよ。

問題 IVC, 1-2. 熱はエネルギーと同等なものである。日常に使われているエネルギーの単位を2種類述べよ。

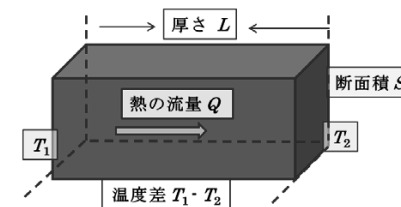
問題 IVC, 1-3. 前問題(問題 IVC, 1-2)の2種類のエネルギーの単位の換算を記述せよ。

問題 IVC, 1-4. 温度とは何か、教科書を読んで感想を述べよ。

問題 IVC, 1-5. 温度の単位にはどんなものがあるか、述べよ。

問題 IVC, 1-6. 絶対温度とはどのようにして決めた単位か述べよ。

[問題 IVC, 2] 次の図は、物質中を伝わる熱の流れを説明するためのものである。ここでは熱が、直方体の左端から右方向に流れる様子を示している。図中の文字の意味は次の通りである。教科書「IVC 6」を読んで、以下の問題に答えよ。



熱の流れのモデル

$Q[\text{W}]$: 断面積を1秒間に通過する熱エネルギー
 $(T_1 - T_2)[\text{K}]$: 左右両端の温度差
 $S[\text{m}^2]$: 直方体の断面積
 $L[\text{m}]$: 熱の流れ方向の物体の長さ

問題 IVC, 2-1. $Q[\text{W}]$ は $S[\text{m}^2]$ と $(T_1 - T_2)[\text{K}]$ に比例し $L[\text{m}]$ に反比例する。この記述を式にせよ。ここで比例定数を K とせよ。

問題 IVC, 2-2. この比例定数 K の名称を答えよ。また、この定数の組立単位を答えよ。

問題 IVC, 2-3. 表 C2 を使って、比例定数 K の大きい物質を 5 つ列挙せよ。

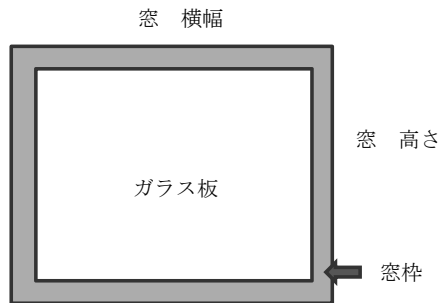
問題 IVC, 2-4. 表 C2 を使って、我々の身の周りのもので、比例定数 K の小さい物質を、4 つ選んで列挙せよ。

[問題 IVC, 3] 熱の伝わり方に関連して、以下の問題に答えよ。

問題 IVC, 3-1. 金属板上に手を置くと冷たく感じるが、木板上ではあまり冷たく感じない、理由を考えよ。

問題 IVC, 3-2. 空気は熱伝導率が最小の物質である。我々の着用する服は空気を着るためであるとさえ言われる。体熱の放散を少なくするために、服装に関して、重要なことは何か考えよ。

[問題 IVC, 4] 自分の部屋のガラス窓を通して 1 秒間に流出（流入）する熱エネルギーを、式(C2) を使って計算しよう。ここではまず、温度差を $1^{\circ}\text{C}(=1\text{K})$ として、単位を W ワットで求めよう。この際、部屋の窓を下の図のように、単純化しよう。教科書「IVC6」を参考にして、以下の順序で計算せよ。長さ・厚さの単位を m で測定し、面積の単位を m^2 で計算せよ。



問題 IVC, 4-1. 窓のサイズを測定せよ。高さ () m、 横幅 () m

問題 IVC, 4-2. 窓の全面積を計算せよ。

問題 IVC, 4-3. ガラス板のサイズを測定せよ。高さ () m、 横幅 () m

問題 IVC, 4-4. ガラス板の面積を計算せよ。

問題 IVC, 4-5. 窓の面積からガラス板の面積を差引し、窓枠の面積を計算せよ。

問題 IVC, 4-6. 窓枠の素材は何か、また、その素材の熱伝導率を表 C2 から読み取れ。単位は、 $[\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}]$ である。

問題 IVC, 4-7. ガラス板の熱伝導率を表 C2 から読み取れ。単位は、 $[\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}]$ である。

問題 IVC, 4-8. 窓枠の厚さを推測せよ。窓枠の厚さ（推測値） () m

問題 IVC, 4-9. ガラス板の厚さを推測せよ。窓枠の厚さ（推測値） () m

問題 IVC, 4-10. 窓枠を通して流出（流入）する熱エネルギーを求めよ。この時、問題 IVC, 4-5. 問題 IVC, 4-6. 問題 IVC, 4-8. の結果、および、温度差を $1^{\circ}\text{C}(=1\text{K})$ として、式(C2) を使って計算せよ。単位を W ワットで求めよ。

問題 IVC, 4-11. ガラス板を通して流出（流入）する熱エネルギーを求めよ。この時、問題 IVC, 4-4. 問題 IVC, 4-7. 問題 IVC, 4-9. の結果、および、温度差を $1^{\circ}\text{C}(=1\text{K})$ として、式(C2) を使って計算せよ。単位を W ワットで求めよ。

問題 IVC, 4-12. 温度差が $1^{\circ}\text{C}(=1\text{K})$ の時、この窓全体を通して流出（流入）する熱エネルギーを求めよ。ここで、問題 IVC, 4-10. の結果と問題 IVC, 4-11. の結果の和を求めるとよい。単位を W ワットで求めよ。

問題 IVC, 4-13. 最後に、温度差が $10^{\circ}\text{C}(=10\text{K})$ の時の、熱エネルギーの流出（流入）量を求めよ。単位を kW キロワットで求めよ。

問題 IVC, 4-14. 自分の部屋のエアコンの電力がいくらか調べよ。単位を kW キロワットで答えよ。

[問題 IVC, 5] 熱やエネルギーの、伝わり方・移動の仕方は、大まかに言って 3 種類ある。教科書「IVC5」を読んで、その 3 種類を挙げて、簡単に説明せよ。

D. 波・音・光

D 1. 波とはなにか

お風呂の中でチャブチャブしてみましょう。水の表面にできる凹凸(おうとつ)は、波の代表です。何が起き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、くぐる前にちよ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疎部が、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、密部と疎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。

$$\begin{aligned} \text{周期} : T [\text{s}] \\ \text{振動数} \cdot \text{周波数} : \nu = \frac{1}{T} [\text{Hz}(= \text{s}^{-1})] \\ \text{波長} : \lambda [\text{m}] \\ \text{伝播速度} : c [\text{ms}^{-1}] \end{aligned}$$

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しましょう。そして、次の二つのことを頭の中で考えてみて下さい。

第一に考えること：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。

168
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 D 1 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 $[\text{s}^{-1}]$ 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 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 秒間に振れる回数は、 $1/T = 5$ となり、周波数は 5 Hz です。

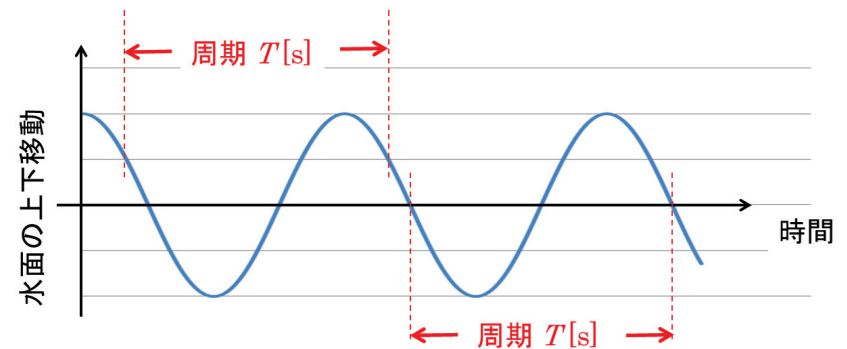


図 D 1. 波：定点での水面の動きをグラフにしたもの

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 秒かかります。ブランコの振動数 $\nu = 1/T = 1/2 = 0.5 \text{ Hz}$ となります。

1 秒間に 60 回変わる西日本の交流電源は $\nu = 60 \text{ Hz}$ で、その周期 T は、 $1/T = \nu = 60$ より $T = 1/60 = 0.0167 \text{ s}$ となります。

第二に考えること：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。これを湯船の縁に沿って図にして、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

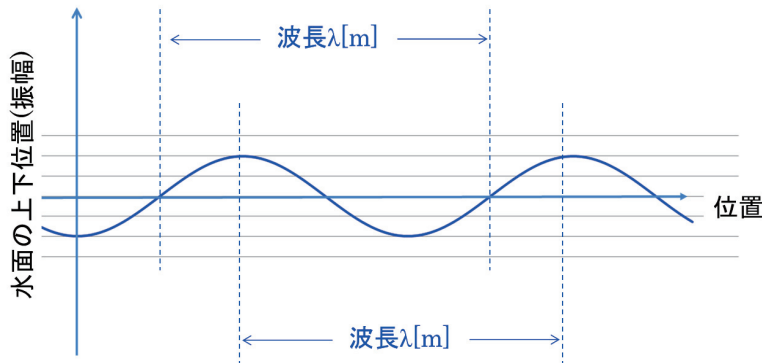


図 D2. 波：時間を止めて一瞬を見たときの波のよう

D 2. 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)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、 $[\text{ms}^{-1}]$ 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。

$$\text{振動数} \times \text{波長} = \text{波の速度} \\ \nu \lambda = c \quad (D1)$$

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。

耳の中の空気を震わせませす。そしてあなたの鼓膜を震わせませす。

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。波長は低音部 17 m、高音部 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。

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**が起ります。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、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。

波を伝える媒体は空気です。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。波の伝播方向と空気の振動方向が平行です。空気中を伝播する**音波は縦波**です。

空気中の音速は 15°C の時 340 ms^{-1} で、音速は振動数によって変わりません。

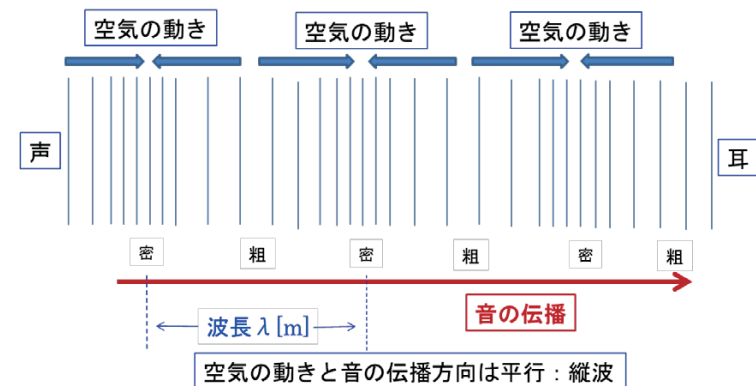


図 D3. 音の伝播と空気の動き 粗密波

D 3. 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か。

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。

$$\text{振動数} \times \text{波長} = \text{波の速度} \quad (\text{D1})$$

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、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、明らかに何か違ってきます。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、誰の声か区別がつかず、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

D 4. 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

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。

それと比べて、人の出す音(声)の波形を見ると、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。

倍音とはなんのでしょうか。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、主要な音と比べると、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。

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 ms^{-1} で、空気中より約5倍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

D 5. 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同じ無理数

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 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 M(= 3×10^6) 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、水中ほどではないと予想されます。ひとまず、人体を氷と考えると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められます。

$$3 \times 10^6 \text{ Hz} \times \lambda [\text{m}] = 3000 \text{ ms}^{-1} \quad \text{より} \\ \lambda = 10^{-3} \text{ m} = 1 \text{ mm}$$

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、この波長に比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。

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します。

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。

ピタゴラスの言うように、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**と言います。

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、灰色印をつけました。

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律音階の比較

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	シ			
246.942	1.3768	2.1189				
261.626	1.2996	2	ド	2	261.626	0.00
277.183	1.2266	1.8877	レ			
293.665	1.1578	1.7818				
311.127	1.0928	1.6818	ミ	1.600	327.032	2.60
329.628	1.0315	1.5874				
349.228	0.9736	1.4983	ファ	1.500	348.834	0.39
369.994	0.9189	1.4142	ソ	1.333	392.438	0.44
391.995	0.8674	1.3348				
415.305	0.8187	1.2599	ラ			
440	0.7727	1.1892				
466.164	0.7294	1.1225	シ			
493.883	0.6884	1.0595				
523.251	0.6498	1	ド	1	523.251	0.00
554.365	0.6133	0.9439	レ			
587.330	0.5789	0.8909				
622.254	0.5464	0.8409	ミ	0.800	654.064	5.19
659.255	0.5157	0.7937				
698.456	0.4868	0.7492	ファ	0.750	697.668	0.79
739.989	0.4595	0.7071	ソ	0.667	784.877	0.89
783.991	0.4337	0.6674				
830.609	0.4093	0.6300	ラ			
880	0.3864	0.5946				
932.328	0.3647	0.5612	シ			
987.767	0.3442	0.5297				
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c₀は、c₀ = 3 × 10⁸ m s⁻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、

$$\begin{aligned} \nu &= 3 \times 10^8 / \{(0.38 \sim 0.77) \times 10^{-6}\} \\ &= (7.9 \sim 3.9) \times 10^{14} \text{ Hz} \\ &= (7.9 \sim 3.9) \times 10^2 \text{ THz} \text{ です。} \end{aligned}$$

T : テラ10¹², G : ギガ10⁹,
M : メガ10⁶, k : キロ10³

D 7. 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。

空气中を進む光線が、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。空气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のが原因です。

水による光の屈折の図を図 D 4 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。

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n \quad (D2)$$

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。

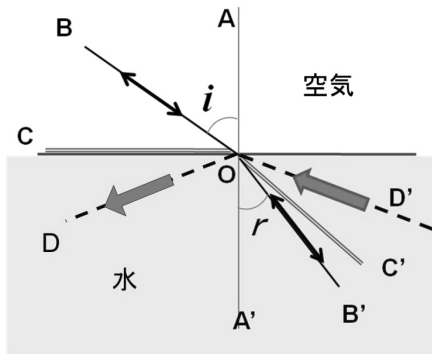


図 D 4. 光の屈折と全反射

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 D 5 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
ありませんか？」

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
一番早いのです」

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「横にあるウキの絵を、見て
ごらん」

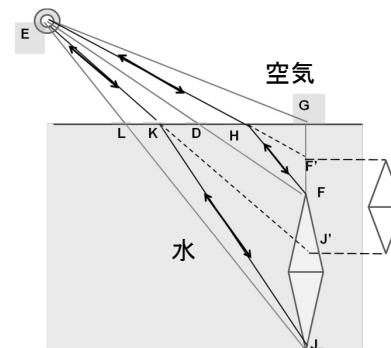


図 D 5. 光の進み方

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きます。つまり、屈折角が違い、曲がり方は、赤色より紫色の方が、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、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

D 8. 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のでしょうか。周囲のものは、あたり前のように色がついています。図 D 6 に二重虹を示します。

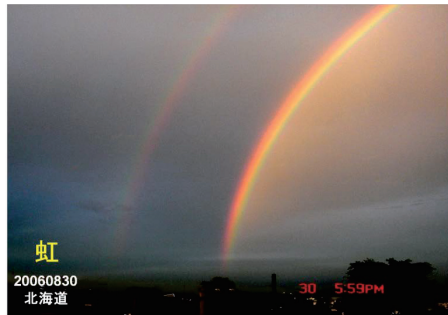


図 D 6. 二重の虹

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。日本では、**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。次頁の図 D 7 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（目が識別）
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

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す。

6. 空中に無数に浮かぶ球形の水滴が、太陽光を受ける
7. 太陽光はこの水滴の中に進入する（図中の A）
8. 水滴に入射する時、光は屈折する
9. 球形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 D 7 中央に示す円を半径 a の球形水滴とし、入射位置を、図中の距離 p で表す
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（図中の B で、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（図中の C）
15. 出て行く方向を射出方向と呼ぶ
16. 図 D 7 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、水滴の半径 a が違ってても、同じであり、光の進む方向は変わらない
18. 光の入射方向と射出方向のなす角 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 は、以下の三式で決まる

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n \quad (D2)$$

$$\theta = 4r - 2i \quad (D3)$$

$$\sin i = \frac{p}{a} \quad (D4)$$

この三つの式から、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 D 7 のグラフに示す、グラフは色毎に異なる
21. 図 D 7 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、入射がちょうど水滴の中心を通る場合である
23. 横軸の値 1.00 は、太陽光が水滴に接するように入射した場合である
24. 図 D 7 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、藍色の下側には紫色があるが、図 D 7 には省略した

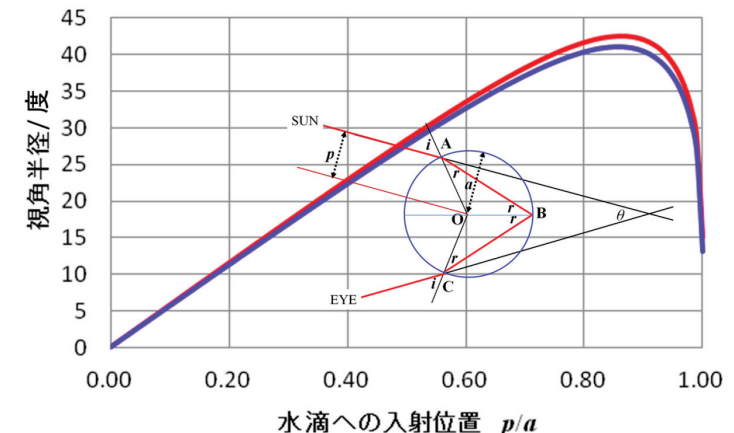


図 D 7. 視角半径と水滴への入射位置の関係

実験 三角プリズムによる分光実験

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が届いている
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。従って、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

D 9. 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

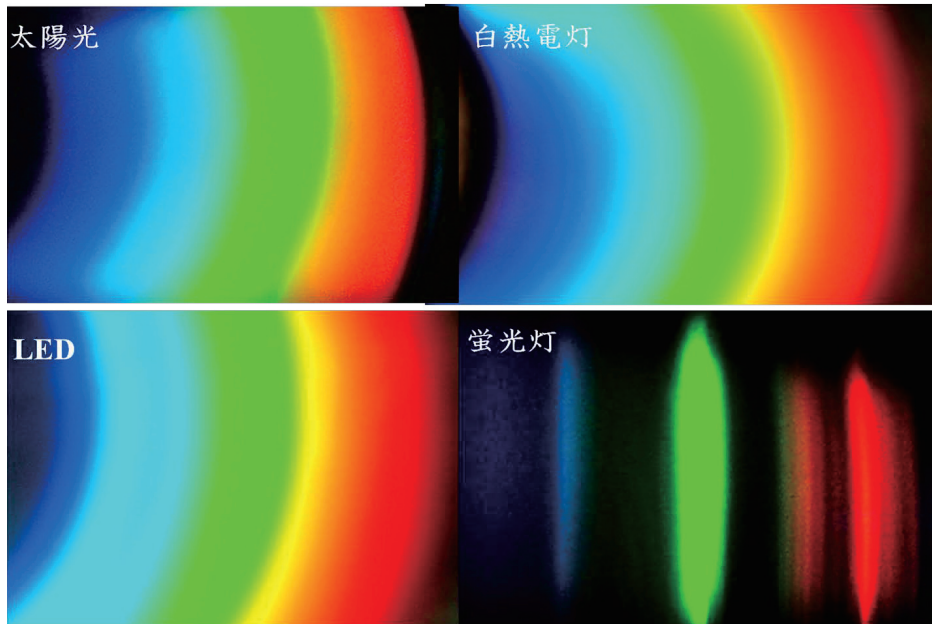


図 D 8. CD 分光器によるスペクトルの観察
太陽光 白熱電灯 LED 蛍光灯

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。蛍光灯の**スペクトル**である (図 D 8 右下)
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 D 8 右下**の**スペクトル**です。デ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 D 8**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。

D 10. 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す、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 D 9**に描きました。音源は**振動数** ν_0 [s⁻¹] の音を出しているとし、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_p [ms⁻¹] とします。音速 c_p は、大気中でおおよそ 340 ms⁻¹です。

図 D 9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、頁 169 の式 (D1) を当てはめると

$$\nu_0 \lambda_0 = c_p \quad (D5)$$

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。

$$\lambda_0 = \frac{c_p}{\nu_0} \quad (D5')$$

$$\nu_0 = \frac{c_p}{\lambda_0} \quad (D5'')$$

無風状態で考えましょう。**図 D 9**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。その速度は、 c_p [ms⁻¹] です。

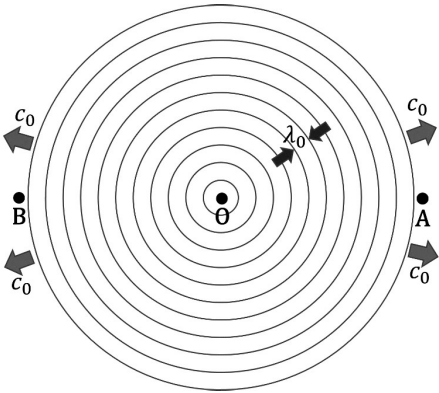


図 D 9. 音源 O の波紋

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 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 D 10 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。

$$\nu_A \lambda_A = c_p \quad (D6)$$

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 $c_p - V_0$ 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 $c_p - V_0$ とすればよいことが分かり、次式になります。

$$\lambda_A = \frac{c_p - V_0}{\nu_0}$$

ここで、式 (D5'') を使って ν_0 を消去すると次式になります。

$$\lambda_A = \frac{c_p - V_0}{c_p} \lambda_0 \quad (D7)$$

観測者 A の聴く音の波長 λ_A が、音源の出す音の波長 λ_0 に較べて、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。

$$\nu_A = \frac{c_p}{c_p - V_0} \nu_0 \quad (D7')$$

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。

$$\nu_B \lambda_B = c_p \quad (D8)$$

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 $c_p + V_0$ の中に ν_0 回の振動が入ることになります。

次に、観測者が移動する時を考えましょう。もう一度、図 D 9 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。

$$\nu_{AS} \lambda_{AS} = c_p \quad (D10)$$

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 1 秒間に $c_p - S_A$ 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。

$$\nu_{AS} = \frac{c_p - S_A}{\lambda_0}$$

式 (D5') を使って λ_0 を消去すると、次式になります。

$$\nu_{AS} = \frac{c_p - S_A}{c_p} \nu_0 \quad (D11)$$

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。

$$\lambda_{AS} = \frac{c_p}{c_p - S_A} \lambda_0 \quad (D11')$$

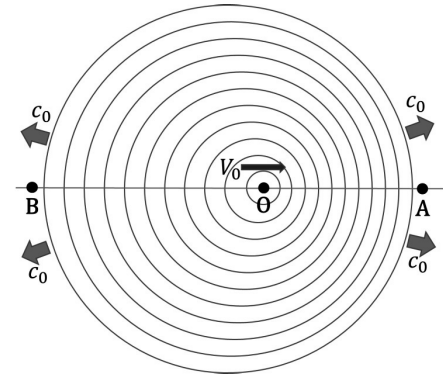


図 D 10. 音源 O が速度 V_0 で観測者 A に向かって移動する場合の波紋

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 $c_p + V_0$ とすればよいことが分かり、次式になります。

$$\lambda_B = \frac{c_p + V_0}{\nu_0}$$

ここで、式 (D5'') を使って ν_0 を消去すると次式になります。

$$\lambda_B = \frac{c_p + V_0}{c_p} \lambda_0 \quad (D9)$$

振動数 ν_B を求めるために、逆数を取って左辺に式 (D8) を、右辺に式 (D5') を使うと次式になります。

$$\nu_B = \frac{c_p}{c_p + V_0} \nu_0 \quad (D9')$$

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と、観測者は A の立場から B の立場に変わります。

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。

$$\nu_{BS}\lambda_{BS} = c_p \quad (D12)$$

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、音波に向かって速度 S_B だけ進みます。

したがって、音波は観測者 B を $c_p + S_B$ 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。

$$\nu_{BS} = \frac{c_p + S_B}{\lambda_0}$$

式 (D5') を使って λ_0 を消去すると、

$$\nu_{BS} = \frac{c_p + S_B}{c_p} \nu_0 \quad (D13)$$

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。

$$\lambda_{BS} = \frac{c_p}{c_p + S_B} \lambda_0 \quad (D13')$$

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。

$$\nu_{OAS}\lambda_{OAS} = c_p \quad (D14)$$

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。

$$\nu_{OAS} = \frac{c_p - S_A}{c_p - V_0} \nu_0 \quad (D15)$$

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。

$$\lambda_{OAS} = \frac{c_p - V_0}{c_p - S_A} \lambda_0 \quad (D15')$$

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。

$$\nu_{OBS}\lambda_{OBS} = c_p \quad (D16)$$

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。

$$\nu_{OBS} = \frac{c_p + S_B}{c_p + V_0} \nu_0 \quad (D17)$$

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。

$$\lambda_{OBS} = \frac{c_p + V_0}{c_p + S_B} \lambda_0 \quad (D17')$$

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') 中の音源の速度 V_0 の符号を、+ を - に、- 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。

$$\nu_{OAS} = \frac{c_p - S_A}{c_p + V_0} \nu_0$$

$$\lambda_{OAS} = \frac{c_p + V_0}{c_p - S_A} \lambda_0$$

観測者 B では次式となります。

$$\nu_{OBS} = \frac{c_p + S_B}{c_p - V_0} \nu_0$$

$$\lambda_{OBS} = \frac{c_p - V_0}{c_p + S_B} \lambda_0$$

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ブ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。

$$c_0 = 30 \text{ 万 kms}^{-1} = 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$$

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**と呼びます。実験で正確に確かめられています。

光のドブラー効果は、次の二つの点で音のドブ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にある時、**縦ドブラー効果**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ブラー効果です。**横ドブラー効果**と呼ばれます。

横ドブ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 D 1 1 に示しました。

図 D 1 1 で観測者を (a) とします。縦ドブ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、**横ドブラー効果**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 D 1 1 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。

$$\nu_b = \frac{c_0 \sqrt{\left(1 - \frac{V^2}{c_0^2}\right)}}{c_0 - V} \nu_0$$

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

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は**青色偏移**と名付けられています。

一方、図 D 1 1 の光源 (c) から出る光を、観測者が見る場合を考えます。観測される光の振動数 ν_c は、特殊相対性理論により次式になります。

$$\nu_c = \frac{c_0 \sqrt{1 - \frac{V^2}{c_0^2}}}{c_0 + V} \nu_0$$

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**と呼んでいます。

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 D 1 1 の (d) の場合、観測される光の振動数は、次式になります。

$$\nu_d = \sqrt{1 - \frac{V^2}{c_0^2}} \nu_0$$

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。

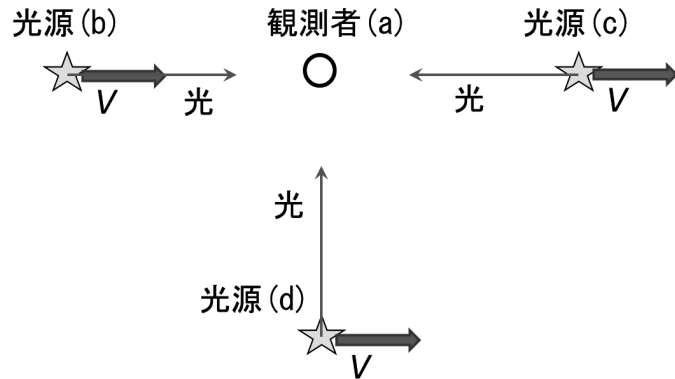


図 D 1 1. 光のドプラー効果における光源と観測者の位置関係 および 相対速度 V

第 IV 章 D. 波・音・光 練習問題

[問題 IVD, 1] 波の一般的な性質について、教科書「IVD 1」を読んで、次の問題に答えよ。

問題 IVD, 1-1. 周期が $T[s] = 2 \text{ s(秒)}$ の波を、下の座標軸に、模式的に描いてみよ。ここでは、繰り返し 2 回分以上を描け。ただし、縦軸を波の振幅とし、その大きさは任意でよい。また、横軸を時間とし、必要な数値目盛りを記入すること



問題 IVD, 1-2. 周期 T の逆数を ν と置くと、この ν を、周波数 または 振動数と呼ぶ。前問題 IVD, 1-1. の周波数はいくらか答えよ。この単位は何か、組立単位で答えよ。また、日頃よく使われているこの単位の名称を答えよ。

問題 IVD, 1-3. 波長が $\lambda [m] = 2 \text{ m}$ の波を、下の座標軸に模式的に描いてみよ。ここでは繰り返し 2 回分以上を描け。ただし、縦軸を波の振幅とし、その大きさは任意でよい。また、横軸を位置とし、必要な数値目盛りを記入すること。



問題 IVD, 1-4. 波の伝播速度 $c [\text{ms}^{-1}]$ と周波数 $\nu [\text{s}^{-1} = \text{Hz}]$ と波長 $\lambda [m]$ の間に成り立つ関係を式で記述せよ。

[問題 IVD, 2] われわれが耳にする音は空気が伝える波である。つまり、音は空気を媒体として伝播する。教科書「IVD 2」「IVD 3」を読んで、次の問題に答えよ。空気中の音波の伝播速度を 340 ms^{-1} として計算せよ。

問題 IVD, 2-1. 音波は縦波である。音波の媒体 (空気) が振動する方向と、音波の伝わる方向の関係について述べよ。

問題 IVD, 2-2. 普通の人が耳で捉えることのできる音は、波の振動数でいうと、どのような範囲か、単位を Hz で答えよ。

問題 IVD, 2-3. また、それらの音の波長はどのような範囲か、単位を m で答えよ。

- 問題 IVD, 2-4. ピアノの中央のラ音は 440 Hz である。この音が空気中を伝わって我々の耳に聴こえる。この時の波長はいくらか、単位を m で答えよ。
- 問題 IVD, 2-5. ピアノのこの音は、弦が振動することによって発生する。ピアノの弦が振動する時、弦の振動の波長を単位 m で答えよ。ただし、この弦を伝わる音の速度 c を、 $c = 5060 \text{ ms}^{-1}$ とする。ピアノの大きさはこれで決まる。
- 問題 IVD, 2-6. 弦の振動数を決める要因に、弦の状態が影響する、どのような要因があるか考えてみよ。

[問題 IVD, 3] 波としての光について、教科書「IVD 6」「IVD 7」を読んで、次の問題に答えよ。

- 問題 IVD, 3-1. われわれの光は太陽からやってくる。光は 1 秒間に 30 万 km も走る。この光速を c_0 とし、単位をメートル毎秒で表すと、 $c_0 = 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ となる。太陽と地球の間の距離をメートル m で表すと、 $1.5 \times 10^{11} \text{ m}$ である。この距離を 1 天文単位と言う。光が太陽から地球に到達するのに、何分と何秒かかるか計算せよ。
- 問題 IVD, 3-2. 光を波として考えると、われわれの目に見える光の波長は、およそ $0.5 \mu\text{m} = 5 \times 10^{-7} \text{ m}$ 近傍である。この光の振動数はいくらか、単位をヘルツ Hz で答えよ。
- 問題 IVD, 3-3. 光が空気中から水中に進むとき、光は屈折する。そのようすを、模式図に描いて示せ。この時、入射角 および 屈折角 を図中に記入せよ。
- 問題 IVD, 3-4. 入射角が異なった場合、屈折角がどのように変わるか、図中に色を変えて、描いて示せ。
- 問題 IVD, 3-5. 逆に、光が水中から空気中に向かうとき、全反射現象が起こることがある。どのような時に全反射が起こるか、図に描いて説明せよ。

[問題 IVD, 4] 雨の後などによく見られる虹について、教科書「IVD 8」を読んで、以下の問題に答えよ。

- 問題 IVD, 4-1. 虹の形はどのような形か。
- 問題 IVD, 4-2. 虹は七色といわれる。普通に見て上方から順に七つの色を記述せよ。
- 問題 IVD, 4-3. 虹の見える方向と、その時の太陽の方向には関係がある。どのような関係があるか述べよ。

- 問題 IVD, 4-4. 真屋に雲の上を飛行機で飛ぶと、雲の上に虹が円形に見えることがある。この時同時に、飛行機の機体の影も雲の上に見える。飛行機の影と虹はどのような位置関係にあるか、想像せよ。

[問題 IVD, 5] 光のスペクトルとは何か、教科書「IVD 9」の冒頭を 3 行書き写してみよ。そして、自分の言葉で言い替えを試みよ。

[問題 IVD, 6] 音のドブラー効果は、日常よく耳にする現象です。周波数 $\nu_0 = 440 \text{ Hz}$ (ラ音) のサイレンを鳴らして、時速 $V_{h0} = 72 \text{ kmh}^{-1}$ で移動するパトカーについて、音の高さがどれぐらい変化して聴こえるか、具体的に計算しよう。教科書「IVD 10」を読んで、以下の問題に答えよ。ただし、無風状態とし、音速を $c_p = 340 \text{ ms}^{-1}$ として計算せよ。

- 問題 IVD, 6-1. パトカーの発する音の波長 λ_0 はいくらか、式(D5') を使って計算せよ。単位を m とし、小数第 2 位まで求めよ。
- 問題 IVD, 6-2. パトカーの時速 V_{h0} を秒速 V_0 に換算せよ。単位は、 $[\text{ms}^{-1} \text{メートル毎秒}]$ で答えよ。
- 問題 IVD, 6-3. このパトカーが静止している人に近づくとする。この時、その人が聴く音の周波数 ν_A を、式(D7') を使って、単位を ヘルツ Hz で計算し、小数点以下を切り捨てて答えよ。
- 問題 IVD, 6-4. この音は、ラ音より高いか、低いかならぬか答えよ。
- 問題 IVD, 6-5. この音は、ラ音よりどれぐらい変化した音か、教科書「IVD 5」表 D1. を参考にして、およその音階で答えよ。
- 問題 IVD, 6-6. パトカーが横を通り過ぎて、遠ざかる時、この人が聴く音の周波数 ν_B を式(D9') を使って、単位を Hz で計算し、小数点以下を切り捨てて答えよ。
- 問題 IVD, 6-7. この音は、ラ音より高いか、低いかならぬか答えよ。
- 問題 IVD, 6-8. この音は、ラ音よりどれぐらい変化した音か、教科書「IVD 5」表 D1. を参考にして、およその音階で答えよ。
- 問題 IVD, 6-9. このように、パトカーがサイレンを鳴らしながら近づき、横を走り抜けて遠ざかる時、どのように音が変化して聴こえるか、まとめよ。

E. 電気・磁気そして電磁波

E 1. 電気の本質

電気の本質は電子と陽子です。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E 1に示します。

電子は、マイナス(-)負電気を、陽子は、プラス(+)正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。

正や負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。電子は負電荷を持っているので、電子を取られた残りの原子は、プラスに帯電します。電子を余分にもらった原子は、マイナスに帯電します。

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。

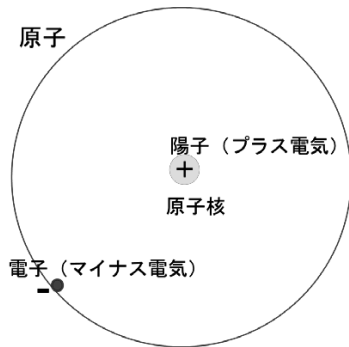


図 E 1. 原子の構造

エボナイト棒を毛皮で摩擦するとエボナイト棒が負に帯電します。ガラス棒を絹布で摩擦するとガラス棒が正に帯電します。

電荷は互いに力を及ぼし合います。

正電荷 と 正電荷 は 反発力
負電荷 と 負電荷 は 反発力
正電荷 と 負電荷 は 引力

その力の大きさは、電荷の量に比例し、電荷間の距離の二乗に反比例します。

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。しかし、万有引力は引力だけがあり、反発力はありません。

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。

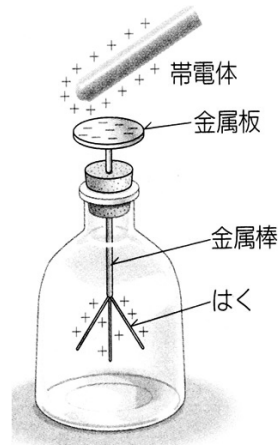


図 E 2. 箔検電器

箔検電器を図E 2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。

ここで、金属板から手をはなすと同時に、ガラス棒を遠ざけると、下部の箔が少し広がります。これは、金属板に残された負電荷が、金属板・金属棒・箔の全体に広がったからです。箔内の負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E 2や上記の説明の、正を負に、負を正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、原子は正電荷を担う陽子と、負電荷を担う電子からできています。これらの電荷が電気の本質です。普通はそれらの数が等しく正にも負にも偏っていません。たとえ偏ってイオンになっても、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。

最初に上部の金属板を手で触り、正や負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。電子が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正電気で帯電させます。正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。

ガラス棒の正電荷によって、金属板に負電荷が引きつけられます。逆に正電荷は、下部の箔の方に押しやられます。箔に正電荷が集まりますが、箔内の正電荷は反発し合い、3枚の箔が開きます。図E 2はその状態を示しています。

次に、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正電荷が、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。

E 2. 電気量・電流・電圧・電力・電気抵抗・ジュール熱

電流とはE 1. で述べた電子の移動です。原子中の負電荷を担う電子は、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、負の電荷を担って負極から正極へ向かいます。そのことを、電流が正極から負極へ流れると約束しました。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す。電子の流れの方向と逆になってしまいました。歴史のいたずらです。が、深く考えなくても、たいいていの場合支障はありません。

電気の流れは水の流りに例えられます。水は、水位の高い所から水位の低い所へ流れます。

同じように電流は、電位の高いところから電位の低いところへ向かいます。正電荷がたくさん集まると、電位が高くなります。それは、すぐ前に述べたように正電荷同士は反発し合うからです。電位の差を電圧と呼び、単位をボルト[V]とします。

電荷の量(電気量)を測る単位をクーロン[C]と呼びます。正電荷の集まりの中に、さらに正電荷を押し込むためには、エ

エネルギーが必要です。エネルギーの単位をジュール[J]として、電圧を以下のように定義します。

電気量 1 C の電荷を、電位差（電圧）に逆らって運ぶのに、エネルギー 1 J を必要とした時、初めの位置と後の位置の電位差(電圧)が 1 V である

単位の関係 $[J=CV]$ (E0)

電位差があれば、金属電線に沿って電気が流れます。単位時間（1秒間）に通過した電荷の量[C]を電流と呼び、単位をアンペア[A]とします。よって、電気量の単位[C]の組立単位は[As]です。

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 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ワット $[W = Js^{-1}]$ です。

$$P [W] = I [A] \cdot E [V] \quad (E1)$$

電気の流れ方は二種類あります。流れる方向が、

1. 決まっている場合 と
2. 絶えず交代している場合 の二種類です。

前者 1. を直流 (DC)、
後者 2. を交流 (AC) と呼びます。

直流電気の電源は、乾電池や蓄電池です。

交流電気の電源は、一般に発電所にあります。発電所では、ファラデーの発見した電磁誘導の原理を使って、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電気が使用されてきました。

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・携帯電話・スマホの電源は直流電源であり、蓄電池の充電を交流電源で行います。充電可能な蓄電池が開発され普及しました。

電流の流れ易さは物質により異なります。

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、絶縁体または不導体と呼びます。

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。単体ではシリコン珪素 Si、ゲルマニウム Ge が代表で、その他、多くの化合物が半導体に属します。

およそ 200 年前から半導体の持つ特徴的性質の発見がありました。最近 100 年の間には、物質の物理学が進歩し、超高純度 Si や Ge (%の前に 9 が 10 個も並ぶ純度) の精製技術が開発され、高度な電気回路技術が、半導体から生まれました。

一般に物質中を流れる電流 I [A] は、両端の電圧 E [V] に比例します。式で表すと次式です。

$$E = R \cdot I \quad \text{または} \quad I = \sigma \cdot E \quad (E2)$$

この第 1 式は、オームの法則です。小学校で習います。2つの式の意味は同じですが、比例定数の呼び名が違います。

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。

半導体

ゲルマニウム	7×10^{-1}
珪素	4×10^3
人の皮膚	約 5×10^5

絶縁体・不導体

乾燥材木	$10^{10} \sim 10^{13}$
ガラス	$10^{10} \sim 10^{14}$
ポリエステル	$10^{12} \sim 10^{14}$
硬質ゴム	約 10^{13}
磁器	3×10^{14}
硫黄	2×10^{15}
ポリスチレン	$10^{16} \sim$
石英ガラス	8×10^{17}

電気抵抗または電気伝導度は、物質によって異なります。また、その大きさは伝導体の形や大きさによっても値が変わります。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。

長さを L [m]、断面積を S [m²] とすると、電気抵抗 R [Ω] は次の式で表せます。

$$R [\Omega] = \rho [\Omega m] \frac{L [m]}{S [m^2]} \quad (E4)$$

ここで、比例定数 ρ ローを、体積抵抗率と呼び、単位は[Ωm, オームメートル]です。この値は物質固有の値であり、物質毎に比較し得るものです。この体積抵抗率が大きい物質ほど電気抵抗が大きくなり、小さい物質ほど電気抵抗が小さくなります。

体積抵抗率 ρ [Ωm] の常温近辺での値をウィキペディアから引用し、下表に示します。10 のべき数は、ほぼ正しいが、係数はおよその値です。一般にこの値は温度とともに大きくなります（ただし、半導体は例外です）。

物質名	体積抵抗率 ρ [Ωm]
金属・良導体	
銀	1.6×10^{-8}
銅	1.7×10^{-8}
金	2.4×10^{-8}
アルミニウム	2.8×10^{-8}
真鍮	6×10^{-8}
鉄	1×10^{-7}
ニクロム	1.5×10^{-6}

良導体と絶縁体とで、体積抵抗率が大きく違います、18 桁から 25 桁も違います。

電気抵抗による発熱で、電気エネルギーが熱エネルギーに変換されます。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。湯沸ポット、トースター、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、Ni, Fe, Cr 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、使い易い抵抗値を持つ発熱体をつくることができます。

電気抵抗発熱体が放出するジュール熱 H [J] 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 I [A] と電流が流れる時間 t [s] によって決まります。

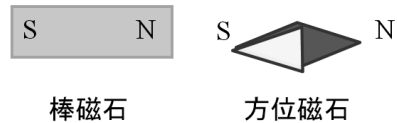
$$H = RI^2t \quad (E5)$$

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。

$$H = EIt \quad (E6)$$

E 3. 磁石

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。図E3に**棒磁石**と**方位磁石**を示しました。共に、永久磁石です。



図E3. 永久磁石

磁石の両端には、**N極**と**S極**があると仮定します。仮定した**N極**と**S極**を、**磁荷**と呼ぶことにします。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。**方位磁石**は質量が小さく、しかもバランスよく敏感にできています。

ここで仮定した磁荷 (**N極**、**S極**) は、力をおよぼし合います。それは、

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** です。

その力の大きさは、磁極の磁荷の量に比例し、極間の距離の二乗に反比例します。これが**磁荷に関するクーロンの法則**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、地球全体が磁石だからです。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。

磁石の特徴は、ここで仮定した**N極**と**S極**は常に、対になって存在することです。

棒磁石の**N極**と**S極**の真中を、のこぎりで切断すると、切断面に新たな**N極**と**S極**が出現し、新たに二本の棒磁石が生まれます。さらに切断しても同じことが繰り返されます。

いつでも**N極**と**S極**とが、対になって現れます。この磁荷の性質は、電荷の場合と最も異なるところです。

これまで図E3のように、磁荷 (**N極**、**S極**) が実際に存在するかのように記述し、描いてきましたが、このように描くことによって、磁場に関するクーロンの法則も簡単に理解できましたし、磁石で楽しく遊ぶこともできました。

しかし実際は、磁荷 (**N極**、**S極**) は、対になって存在するように見えるだけで、単独には、その存在が確認されていません。ですから、磁気の素が、**N極**や**S極**であるとは言えません。

現在では、**磁気の素**はE2で述べた**電流**であるとしています。このことについては、後の節で詳しく説明します。しかしその前に、**電場** (電界) と**磁場** (磁界) について学ばねばなりません。

E 4. 電場(電界)

これまでE2で、電荷同志が力を及ぼし合うことを、**クーロンの法則**で学びました。

しかし、電気の性質は、電荷同志がクーロンの法則で、直接力をおよぼし合う、いわゆる**遠隔作用**と考えるより、「場」を仲介者として力が伝わって行くと考えるのが、都合がよいことが分かってきました。この発想は、**発電の原理**を発見した**ファラデー**によります (1837)。

「場」の考え方の出発点は以下の通りです。電荷同志の力について、次のように考えます。

電荷の存在は、周囲の雰囲気を変えます。電荷の存在による雰囲気の変化が、次ぎ次ぎと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来て、力が働きます

電荷の影響は、瞬時に遠方まで伝わるのではなく、次々と、周りに伝播すると考えるのです。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。その**雰囲気**が、前の人から順次に後ろの人に伝わり、最後尾の人が、先生に注目します。ここまで、少し時間が必要です。

クーロンの法則ではどんなに遠くでも、直接、**電荷同志に力が働く**と考えます (遠隔作用)。ファラデーは、**場**を考え、力は、第1の電荷から、二段階に分けて、第2の電荷に伝わります (近接作用)。

第一段階 第1の電荷が周りに**雰囲気**を作り、広がります

第二段階 その**雰囲気**の中で、**第2の電荷**が力を受けます

第一段階で作られる**雰囲気**のことを、「**電場**」と呼びます。これは小学校で学びます。英語では **Electric Field** です。日本語では「**電場**」または「**電界**」です。

Fieldを「場」と訳した人とそのグループおよび、「界」と訳した人とそのグループが、100年以上も経た現在でも相譲らず、教育現場を混乱させています。

この教科書では「**電場**」を使います。

第1の電荷があるとして、その周りにできる**電場**を、どのように表せばよいでしょう。

その**電場**の中に、**第2の電荷**が存在する時に、受ける力がクーロンの法則に一致するように、**電場**を決めるとよいわけです。そのために、

第一段階で、できる**電場の強さ**は、
 1. 第1の+電荷の**電気量**に**比例**し
 2. 第1の+電荷からの**距離の二乗**に**反比例**して減少するように決めるとよく、

第二段階で、第2の電荷が受ける力は、
 3. この**電場の強さ**と**第2の電荷**との積とすればよいわけです。

これで、**クーロンの法則**と同じ式になります。

電場の単位は、 $[NC^{-1}]$ であることが分かります。それは、**電場**と**電荷[C]**との積が、力[N]であることから明らかです。

電場の単位 = $[NC^{-1}]$ (E7)

電場は、正電荷を持つ第1の電荷を出発点とします。この出発点は電位が高く、電場に沿って進むと、徐々に電位が低くなります。ですから電場は、1 m当たりの電位の変化（電位差 = 電圧）です。よって、電場の単位は、電圧を距離で割ったものにも等しくなります。つまり、

$$\text{電場の単位} = [\text{Vm}^{-1}] \quad (\text{E8})$$

水面と水面を繋ぐ水路に例えると分かり易いかも知れません。水面の高さが電位、水面の差が電位差で、異なった二つの水面を繋ぐ水路の傾きが、電場に例えられます。

傾きが大きければ、水路 1 m 当たりの水面の差が大きくなります。

水路に沿って下って行くと水面が低くなりますが、電場に沿って下がって行くと、電圧が低くなります。

電場の単位の式 (E7)、(E8) は、組立単位を考慮すると、以下の通り同じものです。式 (E0) $J = CV$ と $J = Nm$ を使います。

$$[\text{電場の単位} = \text{Vm}^{-1} = \text{JC}^{-1}\text{m}^{-1} = \text{NmC}^{-1}\text{m}^{-1} = \text{NC}^{-1}] \quad (\text{E9})$$

E 5. 磁場(磁界)

磁石は N 極と S 極が対になっており、周囲に独特な雰囲気を作ります。電場の時と同じように、その雰囲気を「磁場」と呼びます。

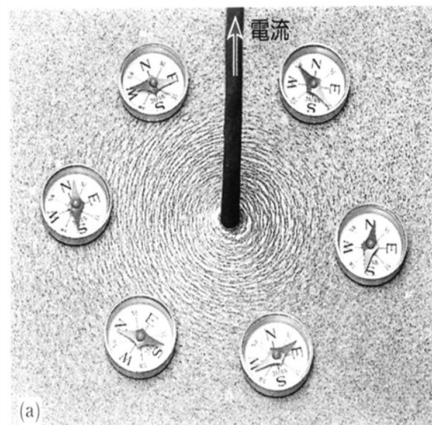
磁石はギリシャの昔からよく知られてきましたが、N 極と S 極が常に対になっており、単独では見出されてません。N 極や S 極が本当に存在するかどうか疑問です。ですから、これらを磁気の素とすることはできません。

結局、磁気の素は、1820 年デンマークのエルステッドとフランスのアンペールの発見を待たねばなりません。二人の発見は、「電流の磁気作用」と呼ばれています。西暦 2020 年は、発見 200 年記念ですが、記念祭は開かれるのでしょうか。

まず、図 E4 を見てください。

中央のまっすぐな導線には、上向きに電流が流れているとします。この電流の周りを取り巻くように、六個の方位磁石が置かれています。方位磁石は磁場の方向に敏感

で、黒色針 N 極が磁場の方向を向き、白色針 S 極が磁場に逆方向を向きます。



右手 👍 いいね!

図 E4. 電流の周りの磁場と右手
方位磁石：黒色 N 極、白色 S 極

この知らせを受けたアンペールは、負けじと実験を重ね、遂に、電流同士が力をおよぼし合うことを突き止めました。この力をアンペールの力と呼びます。

2 本の導線を平行に並べて、電流を流します。そしてその周りに生じる磁場を調べましょう。特に、2 本の導線の間での磁場に注目しましょう。

図 E5 は、前頁の図 E4 を二枚並べたものです。平行導線を通る電流が同じ方向の場合、2 本の導線の間では、磁場の方向が逆向きになって、磁場は打ち消し合う方向に重なっています。その結果、2 本の導線の間では、磁場が希薄になります。その結果、2 本の導線がお互いに引力を及ぼし合います。

次に図には示しませんが、図 E5 の 2 本の導線のうち、片方の電流の向きを、逆にして想像してみてください。導線の間で、磁場が同じ方向に重なりあうことは容易に想像できます。その結果、2 本の導線の間では、磁場が強くなり、2 本の導線は、お互いに斥力を及ぼし合います。

エルステッドは、電気講義の演示実験中に、たまたま導線の近くにあった方位磁石が、電流を流した時だけ、動くことを発見したのです。この時の驚きを隠しきれず、とうとう講義を中断してしまったということです。

方位磁石をよく観ると、電流の周りに、電流を取り巻くように、磁場が発生していることが分かります。自然の法則の発見です。理由はありません。そうになっているのです。覚える以外に方法はありません。電流の方向とその周りに生じる磁場の関係を覚えて下さい。

それは図の下の、右手の「いいね！」を見て下さい。親指の方向が電流の方向で、他の 4 本の指先方向が、電流の周りに生じる磁場の方向になっています。

「いいね！」と言いながら、右手をにぎるとすぐに覚えることができます。立てた親指の向きが電流で、他の 4 本の指先方向が磁場の向きです。電流を取り巻くように磁場が発生するのです。まことに分かり易い説明です。「いいね！」

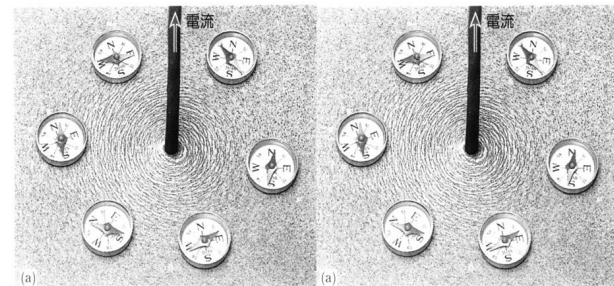


図 E5. 二本の平行な電流の周りの磁場と力の及ぼし合い
電流の方向が同方向の場合、二本の導線の間では、
磁場が打ち消され、二本の電流は引力を及ぼし合う。

アンペールの力は以下の通りです。

平行な2本の導線を通る電流は、力を及ぼし合う。電流が同方向の場合は引力で、電流が逆方向の場合は斥力である。その力の大きさは、いずれの場合も、電流の大きさに比例し、導線間の距離に反比例する。

これもやはり自然の法則です。なぜか理由を考える必要はありません。覚える以外に理解する方法はありません。自然がそうなっているからです。覚えて下さい。

ここで磁場について考えましょう。

二本の電流の間に働く力を、近接作用と考えて、電荷に関するクーロンの法則と同じように、二段階に分けて考えます。

- 第一段階 第1の電流が流れ、その周りに雲囲気を作ります。この雲囲気を磁場と呼びます
 第二段階 その雲囲気(磁場)が周囲に伝わり、第2の電流まで到達し、電流に力を与えます

第1の電流が導線を通り、その周りにできる磁場の強さは、電流の大きさに比例し、導線からの距離に反比例します。

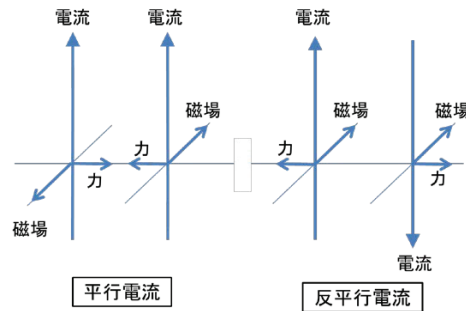
その磁場の中に、第2の導線に通る電流があって、その電流が受ける力の大きさは、磁場の強さと第2の電流の大きさ、および、第2の導線の長さに比例します。

この力をアンペールの力と呼びます。

磁場の組立単位は、アンペールの力の式から導かれ、以下のように決まります。特に、テスラという名称が使われています。

磁場の単位 = $[NA^{-1}m^{-1}]$, テスラ (E10)

ここで図E6に、平行電流と反平行電流で、隣の電流に作用する磁場の方向と、その時受ける力の方向をまとめておきます。



図E6. アンペールの力

SI国際単位系の基本単位A アンペアは、これまでその大きさの定義をしてきませんでした。アンペールの力を使って、ここで初めて、電流1Aの大きさを、次のように定義します。

互いに1m隔てて平行に置かれた、二本の直線状の導線に、同じ大きさの一定電流が流れる時、その2本の電流の間に作用するアンペールの力が、

$$\text{長さ } 1\text{ m 当たり作用する力} = 2 \times 10^{-7}\text{ N}$$

の時、その電流の大きさを1Aとする。ここで、力学と電磁気学が繋がります。

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秒間に導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。

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。すべて導出可能な組立単位です。

電流 I : A, アンペア (SI基本単位)

電気量 Q : C, クーロン = As

電圧 E : V, ボルト = $WA^{-1} = Js^{-1}A^{-1}$

電力 P : AV = W, ワット = Js^{-1}

エネルギー H : Ws (= Nm) = J, ジュール

電気抵抗 R : Ω , オーム = VA^{-1}

電気伝導率 σ : Ω^{-1} , モー = $V^{-1}A$

体積抵抗率 ρ : Ωm , オームメートル

電場: $NC^{-1} (= NA^{-1}s^{-1}) = Vm^{-1}$

磁場: $NA^{-1}m^{-1}$, テスラ

つぎに、導線の形が直線ではなく、円にしてみましょう。円を一周する導線に電流を流してみましょう。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てください。

その電流と磁場のようすを、図E7(a)に描きました。導線を赤いリングで示し、導線上に青色矢印で電流の方向を示しました。

図E4を参考にして、円電流の周りに生じる磁場を考えてみてください。右手で、電流の方向に親指を立て(寝かせ)て、導線を握って「いいね!」をやって下さい。磁場の方向を示す残りの4本の指は、円電流の中心から上向きに湧き出てきて、電流を取り囲みます。その磁場のようすを緑矢印で示しました。

次に、円電流を重ねて繋ぎ、1本の導線にしたものを考えましょう。これをコイル

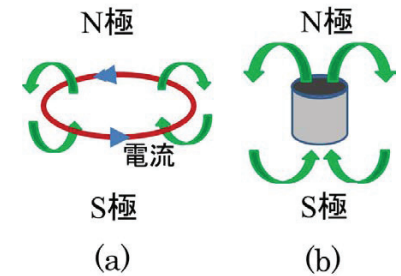
と呼びます。同じ電流で強い磁場を作ることができます。周囲に生じる磁場の方向は、図E7(a)と同じものであります。

この関係を記憶するための簡便な方法は、再び右手の「いいね!」をすればよいのですが、今度は、4本指がコイルに通る電流に沿うようにコイルを握ります。ここでは、コイルの中心から湧き出る磁場が、立てた右手の親指になります。コイルの周りに生じる磁場は、周囲を回ってコイルの逆の先端まで到達します。

図E7(b)に棒磁石を描き、その周りの磁場を緑矢印で示しました。磁場は、磁石のN極を出発点として、ぐるりと回って、下側のS極に到達します。

これらの図から次のことが分かります。円電流あるいはコイルの周囲に生じる磁場と、棒磁石の周囲の磁場は、同じ形をしていて、それらの区別ができません。

このことから結局、棒磁石は円電流であると考えてよいことが分かります。



図E7. 円電流 (a) と棒磁石 (b) 周囲に生じる磁場が等しい

E 6. 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)の後、この節で取り上げるファラデー(1831)の発電の原理の発見が続きます。場の考え方とともに電気と磁気の全体像が徐々に明らかになってきました。

その後、マクスウェル(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を明らかにしました。

マクスウェルが確立した電磁気学の基本法則は、4つの式からできています。基本式1から基本式3までは、これまでにその意味を説明しました。もう一度ここにまとめておきます。全て自然の法則です。

基本式1. 電荷の存在

電荷に関するクーロンの法則
電荷の周りに電場が生じる
電場の中で電荷が力を受ける

基本式2. 磁荷(N極、S極)は常に

対として出現する
磁荷の存在を仮定して、
磁荷に関するクーロンの法則
磁石の周りに磁場が生じる

基本式3-1. 電流の周りに磁場が生じる

3-2. 電場の変化が磁場を誘起する

3-2. は、マクスウェルの鋭い洞察によって発見された法則です。

また、これらの中に「電荷保存の法則」を含みます。その内容は、電流の流入の合計は電荷の変化に等しいこと、つまり、電荷は、無から生じたり知らぬうちに消えなくなったりはしないという法則です。電流がどのように分岐しても、分岐点での出と入りの量は等しいことを意味します。

さてここで、最後の第4番目の基本法則について説明します。電磁誘導の原理と呼ばれています。

基本式4. 磁場の変化が電場を誘起する

仮に、そこに電線があれば、電流が流れます。発電の原理です。

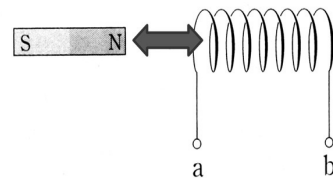
ファラデーによる電磁誘導の発見です。

図E8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E8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。

誘導電流は、棒磁石のN極がコイルに、左から近づくと、図E8のコイルの左端がN極になるようにコイルに電流が生れます。左端がN極になるのですから、このコイルを右手で握り親指が左を向くようにします。つまり、コイルには、握った4本の指先方向に電流が生まれ、端子aに正の電気が蓄積します。一方、端子bに負の電気が蓄積します。



図E8. 電磁誘導

その結果、コイルに電気が発生します。それは端子aが正極に、端子bが負極になって、コイルの両端に電圧が生れます。この電圧を誘導起電力と呼びます。

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、棒磁石が止まると誘導起電力は発生しません。発電を続けるためには、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に電気が発生します。今度は、図E8のコイルの左側が、S極になるように電気が発生し、磁石の動きを妨げます。この場合、コイルを下から握り親指が右に向くようにしなければなりません。その時発生する電気は、端子bに正電気を送り込み、端子aに負電気を送り込みます。従って、ここでは、端子bが正極になり、端子aが負極になります。

正の電極と負の電極が入れ替わりました。これは前に説明した交流電源発生原理です。我々の家庭電気だけでなく、工場機械や鉄道、その他たいの電源は交流電気です。

交流電源の正極と負極の入れ替わりの回数は、周波数と呼ばれ、単位 Hz ヘルツを使います。その組立単位は、 $[s^{-1}]$ です。

周波数は日本全体で統一されておらず、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、東日本では 1 秒間に 50 回です。

昔、東海道線(在来線)に乗車すると、静岡近辺を走りながら1・2分間車内が停電になりました。60 Hz と 50 Hz の電源の切り替えが行うためです。今も変わりありません。

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。しかし、往復の回数を増やすと、周波数が変化します。

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、電池や蓄電池は、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

■ 磁荷が存在するとして、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。その際、場は保守的である。つまり、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、導線が力を受けて移動する方向、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

E 7. 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130年後の現在、「電磁波文明」が豪華に咲き、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も差し支えありません。

中でも、電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。

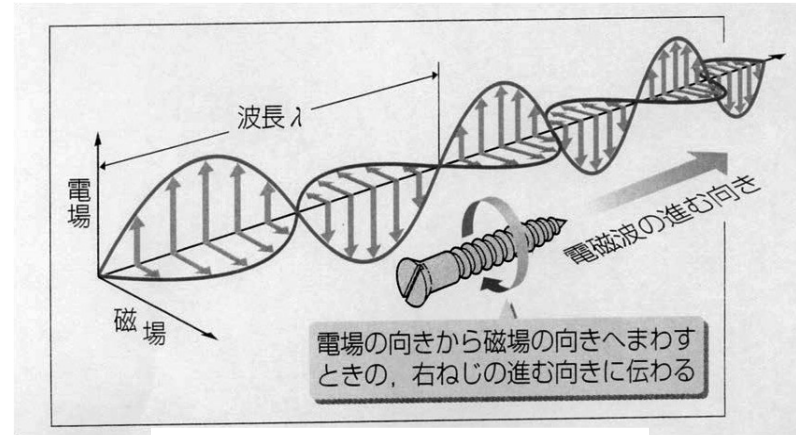
するとなんとしたことでしょう。電場も磁場も、波の一般式と同じ型になったのです。電磁場の中には、両方の波が同時に存在することがわかりました。

ヘルツはその波を**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たので、その式から**電磁波の伝播速度**が予言されました。

ここで予言された**電磁波の伝播速度**が、当時実測されていた光の速度 $3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$ と一致したのです。

このことから、我々が目で見える光は、ヘルツが**電磁波**と命名した波そのものであることがわかりました。

ヘルツが予言し、実証した波のようすを図示したのが、**図E 9**です。



図E 9. 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。電磁波の進行方向は、電場の振動方向と磁場の振動方向の両方に垂直な方向です。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**であることが分ります。

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基本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。

電場の変化が磁場を誘起する

他方、**基本式 4** のファラデーの電磁誘導の法則

磁場の変化が電場を誘起する

この二つの基本法則によります。

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。すぐに消えてしましますが、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、この繰り返しのよってエネルギーが伝播されます。

もう一度、**図E 9**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。そして電場は波として伝播します。

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。そして磁場は波として伝播します。

電場や磁場の振動面のことを光（電磁波）の**偏光面**と呼びます。

図 E 9 は、電場の偏光面と磁場の偏光面が相対的に 90 度をなすことを図示したものです。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

E 8. 電磁波

目に見える光の波長は $0.77\sim 0.38\ \mu\text{m}$ ($770\sim 380\ \text{nm}$) であること、波長は色で区別できること、長波長が赤色で、短波長が紫色であること、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。

E 7 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 $3\times 10^8\ \text{ms}^{-1}$ 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、

$$(3.9\sim 7.9)\times 10^{14}\ \text{Hz}$$

電場の偏光面に対して直交しています。そのことを図 E 9 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、**偏光板**を使って偏光の現象を見ることが出来ます。実験してみましょう。**(実験 2 O)**

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。

式から予言された伝播速度が、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、周波数の単位を **Hz** ヘルツとして、その名を使わせてもらっています。前に述べたように、周波数の単位 **Hz** の組み立て単位は、 $[\text{s}^{-1}]$ です。

の範囲となります。

この目に見える波長だけが、電磁波ではありません。

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。

ただし、全部が混ざると無色透明

紫外線： $10^{-7}\ \text{m}$ 、 $10^{15}\ \text{Hz}$
(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： $10^{-10}\ \text{m}$ 、 $10^{18}\ \text{Hz}$

X 線と、最近話題に上る γ 線が続きます

X 線： $10^{-12}\ \text{m}$ 、 $10^{20}\ \text{Hz}$
(原子中の電子の状態が変化(遷移)する時に発生)

γ 線： $10^{-15}\ \text{m}$ 、 $10^{23}\ \text{Hz}$
(原子核の結合エネルギーの変化核崩壊・核分裂・核融合で発生)

これらの中で、光以外の領域で、最も我々に身近な電磁波は**電波**です。テレビやラジオの放送に使われています。携帯電話やスマホその他、個人的に使用している電磁波がたいへん多くなりました。

既に述べた交流電源も、周波数の低い電磁波と言えます。周波数は西日本では **60Hz**、東日本では **50Hz** 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。電柱の助けを借りて、電気を運んでいます。

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。

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**と呼ばれません。通信に使われています。詳しい分類

超長波 ALF： $10^4\ \text{m}$ 、 $10^4\ \text{Hz}$
長波 LF (通信)： $10^3\ \text{m}$ 、 $10^5\ \text{Hz}$
中波 MF (ラジオの電波)： $10^2\ \text{m}$ 、 $10^6\ \text{Hz}$
短波 HF (短波放送)： $10\ \text{m}$ 、 $10^7\ \text{Hz}$
超短波 VHF (テレビ放送)： $1\ \text{m}$ 、 $10^8\ \text{Hz}$
極超短波 UHF(テレビ放送): $10^{-1}\ \text{m}$ 、 $10^9\ \text{Hz}$

VHF 用テレビアンテナは、その波長： **1 m** 程度のサイズです。UHF 用のものは、ひとまわり小さいアンテナが使われます。

マイクロ波と呼ばれる領域の電磁波が続きます。およその波長がその名称です。

センチ波 SHF： $10^{-2}\ \text{m}$ 、 $10^{10}\ \text{Hz}$
ミリ波 EHF： $10^{-3}\ \text{m}$ 、 $10^{11}\ \text{Hz}$
サブミリ波： $10^{-4}\ \text{m}$ 、 $10^{12}\ \text{Hz}$

サブは、「その下」を意味する接頭語です

次の領域は、**赤外**とか**紫外**とか、我々に馴染みのある名称が使われる領域です。

遠赤外線： $10^{-4}\ \text{m}$ 、 $10^{12}\ \text{Hz}$
赤外線： $10^{-6}\ \text{m}$ 、 $10^{14}\ \text{Hz}$
(原子や分子の振動の周波数を持つ、人は暖かさを感じる)
近赤外線： $10^{-7}\ \text{m}$ 、 $10^{15}\ \text{Hz}$

可視光線 (赤色)： $7.7\cdot 10^{-7}\ \text{m}$ 、 $3.9\cdot 10^{14}\ \text{Hz}$
可視光線 (紫色)： $3.8\cdot 10^{-7}\ \text{m}$ 、 $7.9\cdot 10^{14}\ \text{Hz}$
赤色から紫色の範囲が人間の目に見える

第IV章 E. 電気・磁気そして電磁波 練習問題

[問題 IVE, 1] 物質は全て原子からなる。原子を構成する陽子と電子が、電気素である。教科書「IVE 1」「IVE 2」を読んで、電気に関する以下の問題に答えよ。

- 問題 IVE, 1-1. 電気にはプラスとマイナスの2種類の電荷がある。プラス電荷を担うものは何か、また、マイナス電荷を担うものは何か、原子を構成するものから選んで、それぞれ答えよ。
- 問題 IVE, 1-2. プラスイオンおよびマイナスイオンとはどのような状態のものか説明せよ。また、その安定性について考えよ。
- 問題 IVE, 1-3. 電流とはその実態は何か、説明せよ。また、電流の単位は何か、その記号と読み方を述べよ。
- 問題 IVE, 1-4. 電圧とはどのように定義されたものか、定性的に述べよ。また、電圧の単位は何か、その記号と読み方を答えよ。
- 問題 IVE, 1-5. 電流と電圧の積を電力と言う。電力の単位は何か、その記号と読み方を述べよ。また、その組立単位を示せ。
- 問題 IVE, 1-6. 電力の物理的な意味を述べよ。

[問題 IVE, 2] 電荷同志が、力をおよぼし合う。この力の発見者は1789年クーロンである（電荷に関するクーロンの法則）。クーロンは、電荷同志が直接力をおよぼし合うと考えた。一方、電荷がその周りに作る雰囲気電場と呼び、この電場を仲介者として、電荷同志は力をおよぼし合うと考える。この電場の考え方の発明者は、1831年ファラデーである。教科書「IVE 1」「IVE 4」を読んで、次の問題に答えよ。

- 問題 IVE, 2-1. 同符号の電荷同志は引力か、反発力かを答えよ。
- 問題 IVE, 2-2. 異符号の電荷同志は引力か、反発力かを答えよ。
- 問題 IVE, 2-3. 電荷同志がおよぼし合う力の大きさ F_{12} [N] は、第1の電荷の大きさ Q_1 [C] と第2の電荷の大きさ Q_2 [C] の両者に比例する。さらに、2つの電荷間の距離 R_{12} [m] の二乗に反比例する。このことを式で記述せよ。ここで、比例定数を k_0 とせよ。これが、電荷に関するクーロンの法則である。
- 問題 IVE, 2-4. 第1の電荷 Q_1 が周りに作る電場の大きさ E_{12} [Vm⁻¹] は、第2の電荷との積が、ちょうどクーロンの法則による力の大きさと一致するように決める。電場の大きさ E_{12} を、式で表せ。ここで、電荷に関するクーロンの法則と電場の定義は次の式で与えられる。

$$F_{12} = k_0 \frac{Q_1 Q_2}{R_{12}^2} = k_0 \frac{Q_1}{R_{12}^2} Q_2 \equiv E_{12} Q_2$$

[問題 IVE, 3] 電気抵抗について、教科書「IVE 2」を読んで、以下の問題に答えよ。

- 問題 IVE, 3-1. 電気抵抗 R [Ω (オーム)] と電圧 E [V] と電流 I [A] の間に成り立つ関係式がある。式で表せ。また、この法則は、何と呼ばれる法則か、答えよ。

- 問題 IVE, 3-2. 電気抵抗は、同じ物質でも、形状が異なると抵抗値が異なる。ここで、針金状の物体の電気抵抗を考えよう。電気抵抗 R [Ω] は、長さ L [m] に比例し、断面積 S [m²] に反比例する。このことを式で表せ。この時、比例定数を ρ (ロー) とせよ。
- 問題 IVE, 3-3. 前問題の比例定数 ρ は、体積抵抗率と呼ばれる物質固有の定数である。この値を使うと、物質毎の抵抗の大きさを比較することができる。この定数 ρ の組立単位は何か、答えよ。
- 問題 IVE, 3-4. この比例定数 ρ の値が小さい物質を、一般になんと呼ぶか、また、その例を、5つ挙げよ。
- 問題 IVE, 3-5. 同様に ρ が大きい物質を一般になんと呼ぶか、また、その例を5つ挙げよ。
- 問題 IVE, 3-6. 同様に ρ の値が、問題 IVE, 3-4 と問題 IVE, 3-5 の値の、中間の値を持つ物質の呼び名を答えよ。また、その例を2つ挙げよ。

[問題 IVE, 4] 磁気素は、昔は、磁荷 N 極と磁荷 S 極であるとしてきた。しかし、磁荷 N 極と磁荷 S 極は、常に対になっており、単独では発見されていない。現在、磁気素は、未発見の磁荷ではなく、電流であるとしている。その理由は、円形状の導線を流れる電流（円電流と呼ぶ）が、棒磁石と全く同じ動きをすることが確かめられているからである。従って、磁気の出発点は電流とします。教科書「IVE 3」「IVE 5」を読んで、以下の問題に答えよ。

- 問題 IVE, 4-1. 上記の考えに従って、電流が周りに作る雰囲気電場を考える。この雰囲気電場と呼ぶ。まず、一本の真直ぐな導線に流れる電流（直線電流と呼ぶ）を考え、その周りに方位磁石を置いて、磁場がその周りにどのように分布するか調べる。その結果を、図に描いて答えよ。ここでは、図 E 4. を参照せよ。これは、1820年エルステッドの発見である。
- 問題 IVE, 4-2. 次に、直線電流を二本考える。二本の平行に並ぶ導線に、同方向に電流が流れているとする。この時、二本の導線の間の磁場の分布は、どのようになるかを想像して、図に描いて示せ。ここでは、図 E 5. を参照せよ。
- 問題 IVE, 4-3. 前問題と同様に並ぶ、直線電流を二本考える。この二本の導線に、逆方向に電流が流れているとする。この時、二本の導線の間の磁場の分布は、どのようになるか。教科書に図は描かれていないが、想像して描いて示せ。
- 問題 IVE, 4-4. 二本の平行な直線電流は、力をおよぼし合うことが、1820年アンペールによって発見された。電流の方向が同方向の場合、引力か、反発力か、二本の電流の間の磁場の分布から、直感的に想像して答えよ。また、二本の電流が逆方向の場合はどうなるか。同様に想像して答えよ。
- 問題 IVE, 4-5. 次に、直線ではなく、円形にした導線に電流を流し円電流を作る。その周りにできる磁場を想像して、図に描いて示せ。
- 問題 IVE, 4-6. 前問題の磁場の分布と、棒磁石の周りに生じる磁場の分布を比較せよ。ここでは、図 E 7. を参照せよ。

[問題 IVE, 5] 前問題で、「磁気素が電流である」ことが納得できたと思います。しかし、「磁荷 N 極と磁荷 S 極が、本当に存在するかもしれないとする」考え方も、あることができません。理由は分かりやすいことです。それだけではなく、磁荷 N 極

や磁荷 S 極があると仮定して、それらの力のおよぼし合いを調べると、電荷の場合のプラス電気とマイナス電気の力のおよぼし合い方と、全く同じ形の法則に行き着きます。もちろん、磁気の素が電流であるとした場合も、力のおよぼし合いは全く同じ結果が得られます。教科書「IVE3」を読んで、以下の問題に答えよ。

- 問題 IVE, 5-1. 一本の棒磁石は、磁荷 N 極と磁荷 S 極が対になっているように見える。棒磁石を N 極と S 極の中央で切断すると、棒磁石はどうか答えよ。さらに、切断を繰り返すとどうなるか、想像せよ。
- 問題 IVE, 5-2. 単独に存在すると仮定した N 極と S 極の間におよぼし合う力の法則を、記述せよ。この法則を 1789 年磁荷に関するクーロンの法則と言う。
- 問題 IVE, 5-3. 地球上では方位磁石の N 極が北の方向を指し、S 極が南の方向を指す。その理由を想像せよ。

[問題 IVE, 6] 教科書「IV 図 E 8」を参考にして、電磁誘導について、以下の問題に答えよ。

- 問題 IVE, 6-1. 棒磁石とコイルをつかって、コイルの両端に、交流電圧を誘起させるには、どうすればよいかを説明せよ。
- 問題 IVE, 6-2. 交流電圧を高くするためには、どのような工夫が考えられるか、答えよ。
- 問題 IVE, 6-3. 交流の周波数を 60 Hz にしたい。棒磁石またはコイルをどのように動かせばよいか、想像して答えよ。

[問題 IVE, 7] 力学に関する自然の法則の発見は、1687 年頃のニュートンやその他の物理学者によります。その主なものは、「万有引力の法則」と「運動の法則」です。一方、電気と磁気に関する自然の法則の発見は、1789 年のクーロンから 1820 年エルステッド、アンペール 1831 年ファラデーと続きます。それらは 1861 年頃 マックスウェルによって、4 つの基本式に整理されました。重要なことは、電気と磁気は切っても切れない関係にあることです。教科書「IVE6」の「4 つの基本法則」を読んで、以下の問題に答えよ。

- 問題 IVE, 7-1. 「電場が誘起される」のは、基本式 1. の「電荷の周り」以外に、どのような時か、4 つの基本式の中から 1 か所選んで答えよ。
- 問題 IVE, 7-2. 「磁場が誘起される」のは、基本式 2. の「磁石の周り」以外に、どのような時か、4 つの基本式の中から 2 か所選んで答えよ。
- 問題 IVE, 7-3. 電場と磁場は互いに絡み合っている。4 つの基本式の中で、絡み合っていると云えるところを、2 か所抽出して書き写せ。

[問題 IVE, 8] 前問題で分かったように、電場と磁場は互いに絡み合っている。その絡みを解きほぐしたのは 1888 年ヘルツです。電場と磁場は絡み合いながらも、それぞれ波として伝わることを見つけ、実験で実証しました。ヘルツは、その波を電磁波と命名しました。さらに、その波の伝播速度が、 $c = 3 \times 10^8 \text{ms}^{-1}$ (1 秒間に 30 万 km) であることも算出しました。このことから、我々の目にする光は、この電磁波であることが分かりました。波については教科書「IVD. 波・音・光」を読ん

で、光と電磁波については、教科書の「IVE7. 光の本質の発見」を読んで、以下の問題に答えよ。

- 問題 IVE, 8-1. 電場と磁場との絡み合いと、それによる電磁波の伝播方向を図に描いて示せ。この時、図 E 9. を参照せよ。電場の向きと、その大きさの変化の仕方、および、磁場の向きと、その大きさの変化の仕方、さらに、電磁波の進行方向とエネルギーの伝播方向について、どのような関係があるかを説明せよ。ただし、電磁波のエネルギーの移動方向は、電磁波の進行方向と同じとする。
- 問題 IVE, 8-2. 電磁波は波である。電磁波の波長を、前の問題 IVE, 8-1 で描いた図中に書き込め。
- 問題 IVE, 8-3. 電磁波は波である。波長と振動数が波の特徴を表すパラメータである。振動数とは何か説明せよ。また、振動数の単位は何か答えよ。
- 問題 IVE, 8-4. 電磁波は波である。よって、波の一般的な法則に従う。波の波長 λ [m]、波の振動数 ν [Hz = s^{-1}]、波の伝播速度 c [ms^{-1}] の間の関係を式で記述せよ。ここで伝播速度 c [ms^{-1}] の値を記せ。
- 問題 IVE, 8-5. われわれの眼で見る光の中で青色の光の波長は、 $0.5 \mu\text{m} = 5 \times 10^{-7} \text{m}$ であるとする。青色の光の振動数を求めよ。単位を Hz で答えよ。

[問題 IVE, 9] 電磁波は波長によっていろいろと異なった性質を持っている。我々は、その特徴を有効に利用して、日常生活に活用している。以下の問題に答えよ。ここでは、式(D1)を何度も使うこと。

- 問題 IVE, 9-1. 波長がほぼ 1 km の電磁波から、波長が 10 cm 位の電磁波は、主に通信に使われる。我々のよく使うラジオ放送、テレビ放送に使われる電磁波を、特に電波と呼ぶ。これらの波長領域、周波数領域を、それぞれ示せ。これらの電磁波を発生させる方法について、調べてみよ。
- 問題 IVE, 9-2. センチ波、ミリ波、サブミリ波と呼ばれる電磁波は、その波長が名前に使われている。およその周波数をそれぞれ答えよ。また、これらの電磁波の中で電子レンジ(チン)に使われている電磁波は、どのような波長の電磁波か、調べて答えよ。(家にあるチンの説明書に書かれているはずです)
- 問題 IVE, 9-3. われわれが赤外線と呼ぶ電磁波の、およその波長領域と、およその周波数領域を答えよ。また、赤外線はどのような特徴を持っているか述べよ。
- 問題 IVE, 9-4. われわれの眼に見える光を可視光線と呼ぶ。可視光線の波長領域と周波数領域を答えよ。
- 問題 IVE, 9-5. われわれの眼に、赤色・黄色・緑色・紫色に見える光の波長を、それぞれおよその値を推察して答えよ。単位を μm または m で答えよ。
- 問題 IVE, 9-6. われわれが紫外線と呼ぶ電磁波の、およその波長領域と周波数領域を答えよ。また、紫外線の特徴を述べよ。
- 問題 IVE, 9-7. われわれが X 線と呼ぶ電磁波の、およその波長領域とおよその周波数領域を答えよ。また、X 線の発生方法を調べよ。さらに、X 線の特徴を述べよ。
- 問題 IVE, 9-8. われわれが γ (ガンマ) 線と呼ぶ電磁波の、およその波長領域とおよその周波数領域を答えよ。 γ 線の特徴と発生方法を答えよ。

F. 太陽の温度・地球の温度

F 1. 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。(頁 180 図 D8)

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わります。

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 F 1**で見てください。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 F 1 (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 F 1 (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 F 1 (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 F 1 (d) には、1500K(1227°C)を示しました。

図 F 1 (e) には、1000K(727°C)を示しました。

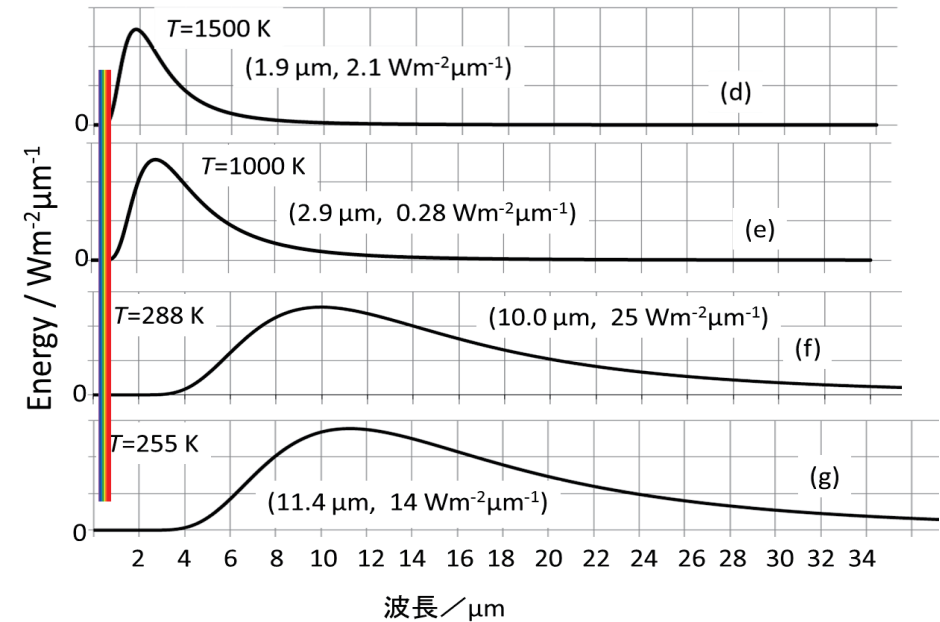
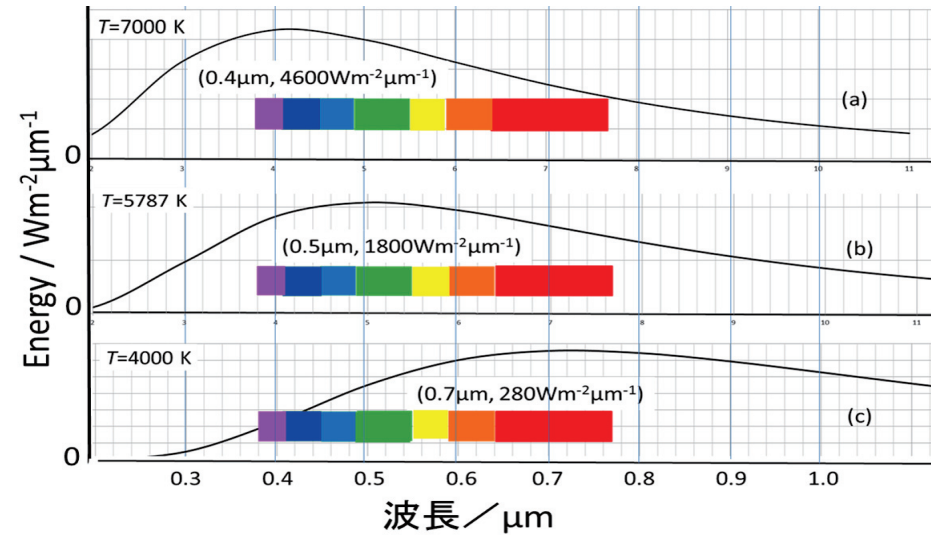


図 F1. 色々な温度の放射スペクトル。
色は人の目に見える領域

図 F 1 (f) は、現在の地球表面の平均気温 288 K (15°C) の物体が放射する光のスペクトルです。

図 F 1 (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°C) 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 F 1 の横軸は、全て光の波長で、図 F 1 (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 F 1 (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 $\lambda+1$ 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 F 1 (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 F 1 (b) の値が最も現実に近い値です。図 F 1 (a) では、太陽の表面温度が実際より高く、図 F 1 (c), (d), (e) では、実際より低い値です。

図 F 1 (f) のスペクトルは、地球の温度が 15°C (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、地球大気の高さ 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 F 1 (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、地球になるであろう温度、-18°C (255 K) の物体のスペクトルです。図 F 1 (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 11.4 μm と、地球大気の高さ 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、地球が放射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。

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きました。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。

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びつたりあうのです。次のような式です。

スペクトルを波長 λ で表現した式は、

$$B(\lambda)d\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} d\lambda \quad (F1)$$

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、

$$E(\nu)d\nu = \frac{2\pi h}{c^2} \frac{\nu^3}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} d\nu \quad (F2)$$

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

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。

F 2. シュテファン・ボルツマンの法則 と ウィーンの変位則

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、ウィーンの変位則です。どちらも、プランクの放射式の核心を表現したものでした。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 m^2 当たり、1 秒間に放射する総エネルギー Z は、

$$Z(T) = \sigma T^4 \quad (\text{F3})$$

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、

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4} \quad (\text{F4})$$

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 F 1 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 F 1 (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 年のウィーンの変位則です。

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 F 1 の曲線から分かるように、スペクトルは極大値一つ持ちます。

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 、と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 の積が一定です。式にすると、

$$T\lambda_M = 2.898 \times 10^{-3} \quad (\text{F5})$$

この式もプランク放射式 (F1) を、 λ で微分して、傾きを 0 として導き出せます。

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。

ウィーンの変位則は、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 F 1 (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 F 1 (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。

F 3. 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。

ウィーンの変位則によると、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が、

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が、

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が、

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 F 2 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、ウィーンの変位則を使って、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 $0.44 \sim 0.52 \mu\text{m}$ に分布します。式 (F5) を使って得られる太陽の表面温度は、 $6600 \sim 5600 \text{ K}$ 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 F 2 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がたいところがあります。

この 6000 K を使って、ウィーンの変位則をあてはめると、スペクトルの極大値の波長は $0.483 \mu\text{m}$ 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ます。

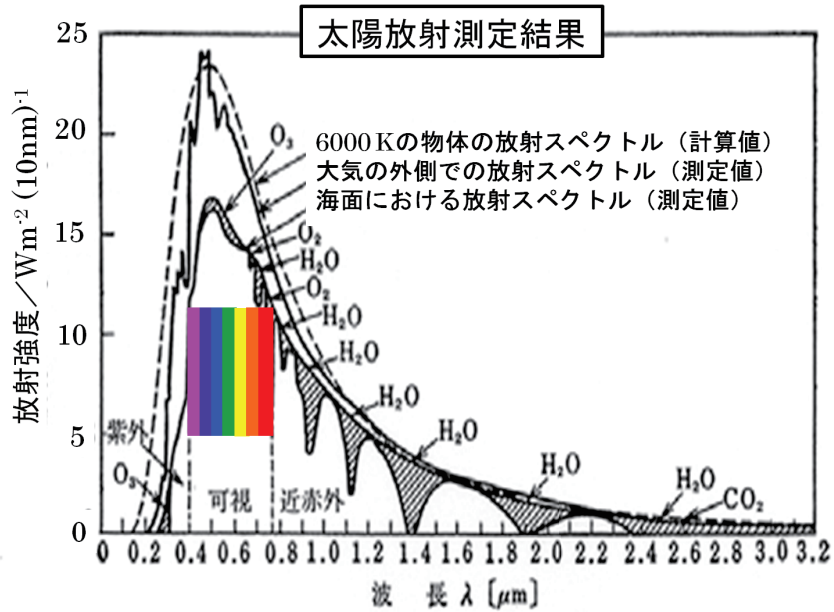


図 F 2. 太陽放射のスペクトル観測結果

F 4. 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 m^2 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 との関係を探り、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 m^2 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。

$$Z(T_S) = \sigma T_S^4 \quad (F3')$$

$$\text{ただし、} \sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4} \quad (F4)$$

太陽の半径を $R_S (= 6.96 \cdot 10^8 \text{ m})$ 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

$$L_{TS} = 4\pi R_S^2 \cdot Z(T_S) = 4\pi R_S^2 \cdot \sigma T_S^4 \quad (F6)$$

となります。

ここで、 T_S を有効温度 5787 K とし、式(F6)を使って、数値を求めると、

$$\begin{aligned} L_{TS} &= L_{6000} = 4 \cdot 3.14 \cdot (6.96 \cdot 10^8)^2 \\ &\cdot 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot (5.787 \cdot 10^3)^4 \\ &= 3.87 \cdot 10^{26} \text{ W} \quad (F6') \end{aligned}$$

となります。太陽の表面から放出する総エネルギーは、 $3.87 \cdot 10^{11}$ 兆 kW となり、1秒間に、 $3.87 \cdot 10^{11}$ 兆 kJ のエネルギーを放出します。

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_{doHe} は、 $0.428 \times 10^{-11} \text{ J}$ です。(頁 103)

式(F6')の値をこの値で割ると、 $0.904 \cdot 10^{38}$ 個、質量にして $6.01 \cdot 10^{11} \text{ kg}$ となります (He 原子1個の質量 $6.65 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 第 III 章 頁 102 図表 III-9)。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となります。

太陽の年齢 45 億年 ($1.42 \cdot 10^{17}$ 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 $0.85 \times 10^{30} \text{ kg}$

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 $1.7 \times 10^{30} \text{ kg}$ と考えてよいでしょう。理科年表によると、太陽の質量は、 $1.989 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ となっています。ここで行った概算は大きな間違いはないようです。

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天文単位と言ひ、その値は、

$$a = 1.50 \cdot 10^{11} \text{ m} \quad (F7)$$

です。この距離だけ離れて、 1 m^2 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。

$$S = \frac{L_{TS}}{4\pi a^2} \quad (F8)$$

この式に、式(F6)の L_{TS} を代入すると、

$$S = \frac{4\pi R_S^2 \cdot \sigma T_S^4}{4\pi a^2} \quad \text{よって、}$$

$$S = \left(\frac{R_S}{a}\right)^2 \cdot \sigma T_S^4 \quad (F9)$$

となります。地球大気の外側の 1 m^2 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、

$$S = 1367 \text{ W}$$

を代入して、

$$1367 = \left(\frac{R_S}{a}\right)^2 \cdot \sigma T_S^4 \quad \text{この式を}$$

太陽の表面温度 T_S について解くと、

$$T_S = 5787 \text{ K}$$

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、

$$S_0 = 1367\text{W} \quad (\text{F10})$$

$$T_{S0} = 5787\text{K} \quad (\text{F11})$$

とにおいて、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、ウィーンの変位則 式 (F5) によって、

$$\lambda_M = \frac{2.898 \cdot 10^{-3} \text{ mK}}{5787 \text{ K}} = 0.5 \mu\text{m} \quad (\text{F12})$$

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 1m^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、 1.367kW 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、 5787K 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、ウィーンの変位則を用いて、スペクトルの極大値を求めると、 $\lambda_M = 0.5 \mu\text{m}$ 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 $0.38 \sim 0.77 \mu\text{m}$ 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 4.5 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、大猫猿などには、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、同じように与えたとはいえません。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**でしょうか。

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、広く反応できるにちがいないと想像されます。

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 1m^2 当たり**太陽定数** 式 (F10) $S_0 = 1367\text{W}$ 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 $R_E (= 6.367 \cdot 10^6 \text{ m})$ とすると、地球の太陽に対する垂直面積が、 πR_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が。

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、

$$D = (1 - A) \cdot D_0 = (1 - A) \cdot \pi R_E^2 \cdot S_0 \quad (\text{F13})$$

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、

$$D = (1 - 0.3) \cdot 3.14(6.367 \cdot 10^6)^2 \cdot 1367 = 1.22 \cdot 10^{17} \text{ W} = 122 \text{ 兆 kW} \quad (\text{F14})$$

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

$$G = 3.5 \cdot 10^{13} \text{ W} (= 0.035 \text{ 兆 kW})$$

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** $5.7 \cdot 10^{11} \text{ W}$ 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。

$$L_{TE} = (4\pi R_E^2) \sigma T_E^4 \quad (\text{F15})$$

ここでは、地球を温度 T_E の物体と考え、シュテファン・ボルツマンの法則をあてはめました。地球の表面 1m^2 当たり毎秒 σT_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、

$$4\sigma \cdot T_E^4 = (1 - A_E)S_0 \quad (F16)$$

S_0 に式(F10)、 σ に式(F4)を代入し、 $A_E = 0.3$ を使って T_E について解くと、

$$T_E = 255 \text{ K} = (273 - 18) \quad (F17)$$

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、 $-18^\circ\text{C}(255 \text{ K})$ です。地球上の平

F 6. 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。(頁 151)

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。(頁 203)

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(頁 157)、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。

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。

また現在、実際の地球表面の平均気温は、 $15^\circ\text{C}(288 \text{ K})$ 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、 $33^\circ\text{C}(33 \text{ K})$ 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°C 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°C も温暖化しているのです。

そのようすが、**図F2**に示されています。

(頁 215) 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、地球上の海面、海拔 0 m に到達するまでにずいぶん吸収されてしまいます。吸収量がグラフ中の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。食物の温度を上げて料理をします。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。(頁 204)

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°C 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**

F 7. 成層圏の温度降下

地球の表面はすでに 33°C も温暖化していることが分かりました。

33°C 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、多くなるわけではありません。式(F17)の地球の**あるべき温度 $-18^\circ\text{C}(255 \text{ K})$** より高い温度でエネルギーを放出しているわけではありません。

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。それは事実と反します。

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。(頁 150)

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、特に、**二酸化炭素ガス**です。

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か。

それは、地球上空の成層圏・中間圏の温度低下だと思えます。大気温度の垂直構造は、**第IV章A 大気**で学びました。

(頁 117) 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。(頁 118)

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、地表から放射されたエネルギーが、大気で吸収され、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。(頁 210) 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。

F 8. 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(頁 121)。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

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°C 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。H₂O 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 A 8 空気中の水蒸気で述べた通りです。(頁 128) 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低下の理由は、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。

エネルギーを吸収し、分子の振動に変えてしまいます。つまり気温が上がります。

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。

地球表面の気温上昇以外に、温暖化の証拠は何処かに現れていないのでしょうか。

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、これらの変化は、百年近い時間の

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あると考えます。

地球はこれまで何十万年の間に、水蒸気によって 33°C 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ていると考えられます。

このことから推測すると、二酸化炭素による最近の地表の温暖化の結果、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が。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が。

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。年間を通じての上昇温度は 1~2 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。

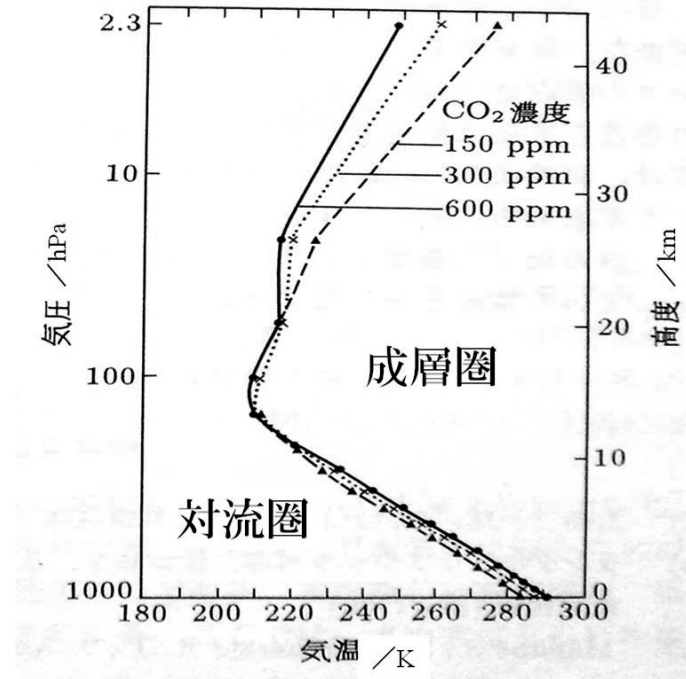


図 F 3. 二酸化炭素濃度と対流圏・成層圏の鉛直気温分布の予想計算の結果
真鍋淑郎著 地球環境の危機
内嶋善兵衛編 (1990) 岩波書店

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 に示します。さらに、上空の温度低下を観測した実測データの実例を図 F4 に示します。

図 F3 (前頁) 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おります。

大気中の二酸化炭素の濃度が、150, 300, 600 ppm の場合、地表から成層圏までの、予想される大気温度の変化が、それぞれ計算されています。

図 F3 の破線と▲印は、二酸化炭素の濃度が 150 ppm の時の予想計算値を示しています。点線と×印は、二酸化炭素の濃度が 300 ppm の時の予想計算値を、実線と●印は、二酸化炭素の濃度が 600 ppm の時の予想計算値を示しています。

以上の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 の下半分に示されています。そこでは二酸化炭素の増加と共に、気温が上昇しています。ここでは、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 以上での予想気温は、図 F3 の上半分に示されています。そこでは、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。

次頁の図 F4 は、1958 年以降の上空大気を高度で 4 つの層に分け、各層での温度

変化を整理集計して示しています。縦軸は温度、横軸は西暦年号で、1958 年から 2005 年まで、およそ 50 年間のデータです。

図 F4 は、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 の上から順に大気を上層から下層へ分けて示されています。4 層は以下の通りです。

- 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

の順に上から並べてあります。

最下部の地球表面、および、そのすぐ上層の対流圏下部では、明らかな気温の上昇傾向が見取れます。また、さらにその上層部、対流圏中部から成層圏下部までの領域では、気温の平均値は少し上昇傾向があるものの、横這いと言ってよいでしょう。

一方その上層部、成層圏下部では、明らかな下降傾向があることが分かります。地球表面の温度上昇とは反対に、成層圏下部では温度が低下しています。

この 50 年間の成層圏下部の温度降下の観測結果は、地球表面の気温上昇の確実な代償であると考えてさしつかえありません。

ただし、この最上層部、成層圏下部のグラフに見られる、突出する温度の上昇は、地球の大規模な火山の噴火による影響だと言うことです。

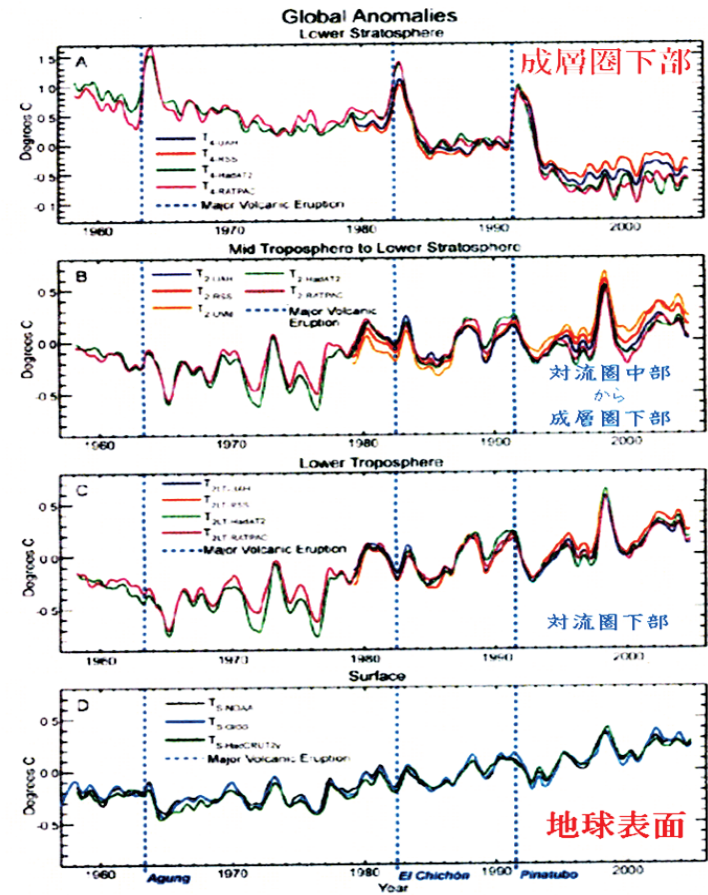


図 F4 . 地球の対流圏成層圏の温度測定結果

Temperature trends in the lower atmosphere
The U.S. Climate Change Science Program より

第 IV 章 F. 太陽の温度・地球の温度 練習問題

[問題 IVF, 1] 太陽は地球上のすべての生命の源です。20 世紀の末、人工衛星を使って、太陽と地球の精密な観測が行われた。そのことによって多くのことが解明された。以下は、解明されたことを、教科書「IVF 太陽の温度・地球の温度」に沿って抽出したものです。

それぞれについて、次のイ、ロ、ハの質問に答えよ。

イ：問題の文章を写筆せよ。

ロ：この問題の文章を、信じられるか、信じられないか、答えよ。

ハ：この問題の文章について、あなたの感想・疑問を記述せよ。

問題 IVF, 1-1. すべての物体から光（電磁波）が放射されている。

問題 IVF, 1-2. 物体が発する光のスペクトルは、物体の温度によって決まっている。

問題 IVF, 1-3. 我々の眼は、光を波長に分けて、色で区別することができる。

問題 IVF, 1-4. 光（電磁波）の伝播は、エネルギーの伝播である。

問題 IVF, 1-5. 光（電磁波）は、波と粒子の両方の性質を持つ。

問題 IVF, 1-6. 物体が放射する光の総エネルギーは、物体の温度（絶対温度）の 4 乗に比例する。

問題 IVF, 1-7. 比較的高温の星は青白く、比較的低温の星は赤く見える。

問題 IVF, 1-8. 太陽光のスペクトルを精密に測定すれば、太陽の表面の温度を知ることができる。

問題 IVF, 1-9. 太陽表面の温度は、5787 K (5514°C) であり、有効温度と呼んでいる。

問題 IVF, 1-10. 太陽光のエネルギーは、地球大気の外側、直射面積 1 m^2 当り 1.367 kW である。この値を太陽定数と呼んでいる。

問題 IVF, 1-11. 太陽光のエネルギーは、地球表面（海拔 0 m）で、直射面積 1 m^2 当りおよそ 1 kW である。

問題 IVF, 1-12. 太陽から地球表面が受ける総エネルギーは、現在全地球人が必要とするエネルギーの 10 万倍以上である。

問題 IVF, 1-13. 地球は太陽からエネルギーを貰って温められている。一方、地球は宇宙へエネルギーを放出している。この時、もらうエネルギーと放出するエネルギーは等しく、バランスがとれている。

問題 IVF, 1-14. このバランスから計算した地球の温度は、255 K (-18°C) である。この温度を裸の地球の温度と呼んだ。

問題 IVF, 1-15. 現実の地球表面の平均温度は、288 K (15°C) であり、過去数 10 万年続いている。

問題 IVF, 1-16. 地球表面はすでに、33 K も温暖化している。この温暖化の原因は、大気に含まれる水蒸気である。水蒸気は温暖化ガスである。

問題 IVF, 1-17. この温暖化のために、地球が宇宙に放出するエネルギーが増えることはない。もし、増加するとすれば、バランスが崩れることになる。

問題 IVF, 1-18. 温暖化によって、地球表面温度が上昇しても、バランスが崩れないのは、地球上空の成層圏で温度が低下しているからである。

問題 IVF, 1-19. 産業革命以降、大気中の二酸化炭素が増加しており、地球表面のさらなる温暖化が進行中である。

問題 IVF, 1-20. さらなる温暖化によって、成層圏では、さらなる温度の低下が観測されている。

以上、20 問題のうち、お気に入りの 5 題について答えよ。

[問題 IVF, 2] 太陽の放射する光のスペクトルを図に示せ。この時、横軸に光の波長を目盛り、縦軸に光の強度を取ってグラフに示せ。また、我々人間の目は、光の波長を色で識別することができる。波長と色の関係をこの図に描き込め。

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。教壇で演示することが多く、一コマの講義で、複数の実験を行うこともあります。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。

なるべく多くの自然の法則を学ぶ実験を選びました。まず、万有引力の法則です。実験 2 から実験 5 までは全て万有引力が関係します。てこの原理、エネルギー保存則、運動の法則、そして、音、光、電気と磁気は現代文明の要です。我々の身の周りに起こることばかりを集めました。電気と磁気の世界は絡み合っています。

実験を準備していない章や節もあります。それらは、
 第 I 章 I-1 黄道 12 星座
 第 III 章 原子と原子核 の全て、
 第 IV 章 F 太陽の温度・地球の温度
 などです。

これらの章や節の実験は適当なものを考え出せません。内容的には、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、いつも北にあるはずの北極星がいつの間にかどこかへ行ってしまう話です。こんなこともあるのかと驚いてください。

この章に関連する実験は、「コマ回し」です。実験 7 でコマを回して、歳差運動(さい

さうどう、すりこぎ運動とも言う)について学びましょう。地球も歳差運動をしています。回転体は、どんな時に歳差運動が起り、どんな時に歳差運動が起らないか、実験をして、地球に当てはめましょう。

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。

第 III 章では、聴き慣れない単語が次々と現れます。相対性理論をはじめ論理はすべて結論だけの記述です。本文を読みながら、そうかそうかそんなものかと、どんどん読んでください。それだけで充分です。

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。光の放射に関してわれわれの予想できない、いわば想定外のことが現実だったのです。ショックです。覚悟して読み進んで下さい。

自然はわれわれの予想しないことが普通に起こっているのです。解明するのに大きな飛躍が必要でした。今ではすっかり判ってしまいました。が、これまでの常識が通じません。そう思って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ーを — 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？」にどう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、「どうなっています」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せん。

サイフォンコーヒメーカーでコーヒーを作りながら、「なぜ？」と質問し、「どうなっているか」を考えてください。

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、その上にコーヒー豆を挽いた粉を置きます。

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してガラスコップに登って行きます。左写真。そして粉と混ざりコーヒーができます。

火を消すと、コーヒー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、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。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。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、次の質問が湧いてきます。そして、「それは水が分子でできていて、温度が上がるとともに動き方が活発になり、・・・と、どうなっているか答えることができます。今では、それははっきり分かっています。

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で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？」ときかさ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、「地球が引っ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。

地球だけではありません。どんな二つの物体も、引力で引き合っています。太陽と地球、地球と月、太陽と惑星、惑星と惑星の間、すべての物体の間に万有引力が働いています。どのような力で引き合っている

のか、ニュートンがその答を出しました。

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、実際に、ニュートンの答通りになっていることを、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して実証することを基本としています。

「なぜ？」と突き詰めると、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。

物理学は常にその危険にさらされています。自然の現象を説明するために都合のよい架空のものを創造してしまうのです。

歴史的に有名なものは、19世紀の後半から始まった、エーテルと呼ばれた光の媒体です。光の伝播の説明に都合がよいものでしたが、実在を実証できませんでした。そして、相対性理論の発見によって、不要なものであることが分かりました。

現在でも、ともすれば、逸脱する危険は大いにあります。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。

素粒子物理学と呼ばれる分野、宇宙物理学と呼ばれる分野では、実証することが困難になっています。前者は対象があまりにも小さすぎて、後者はあまりにも大きすぎて、認識することが困難なうえに、実証することが厄介な分野です。

自分の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

— 水の深さと水圧の関係 —

装置 深いメスシリンダー
底までとどくガラス管
(内径 10 mm 程度) とゴム栓、
または、
透明なビニールチューブと
ピンチコック (下図)



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、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



頁 27 大根の重さと質量

実験 3. 水の中で体が軽い

— 浮力とアルキメデス原理 —
(第 I 章 2 から 4 を参照)

装置 上皿秤 ばね秤 ビーカ
 鍾(おもり) ビニール袋



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_p とする。
 次に、ばね秤に鍾をつるし、その重さの
 目盛を B_s とする

次に、上皿秤に乗せたビーカの水の中
 に、ばね秤の鍾を入れ、吊るしたままに
 する。

その時、上皿秤の目盛が増加して、

C_p になり、ばね秤の目盛が減少して、
 D_s になった。
 この時、これらの値の関係を調べる。

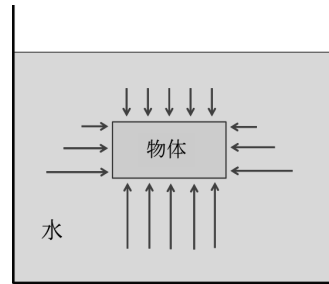
関連して話すこと

鍾のかわりに、水の入ったビニール袋
 を、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法則

水中の物体は、物体が押し出した水の
 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

— トリチェリーの真空 —
(第 I 章 2 から 5、7 から 1 1
 および第 IV 章 A 1 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 気圧では、水銀柱の高さ 760 mm

関連して話すこと

単位の話 長さ 時間 質量

質量とは、物質の量を表す。単位は kg

重さ(重力)とは、地球の引く力のこと。

単位は N ニュートンである

重力の原因は地球

自然の法則 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、

$$F = 9.8 m \quad (V-1) \quad \text{である}$$

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る。
 簡単に、文字 g で表されることが多い。
 g の単位は $[ms^{-2}]$ 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、

$$F = G \frac{\text{物体 1 の質量} \cdot \text{物体 2 の質量}}{\text{物体間の距離}^2} \quad (V-2)$$

ここで計算に必要な定数 G は、

万有引力定数 $G : 6.673 \times 10^{-11}$

物体 1 を地球とし

地球の質量 $= 5.974 \times 10^{24} \text{ kg}$

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 $= 4 \times 10^7 \text{ m}$

半径 $= 6.367 \times 10^6 \text{ m}$

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。

$$F = \frac{6.673 \cdot 5.974 \cdot 10^{13}}{6.367 \cdot 6.367 \cdot 10^{12}} \cdot m = 9.8m \quad (\text{V-1})$$

注 ここで、 m は長さの単位メートルで、 m は物体の質量です

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 : [Pa] = $\frac{\text{N}}{\text{m}^2} = \text{Nm}^{-2}$ (V-4)

具体的な数値計算

水銀の密度 : $13.6 \times 10^3 \text{ kgm}^{-3} = 13.6 \text{ gcm}^{-3}$

水銀柱の高さ 760 mm

水銀柱の断面積 $A \text{ [m}^2]$

断面積 A の上に乗る水銀の質量

$$\begin{aligned} \text{水銀の質量} &= \text{水銀の体積} \times \text{水銀の密度} \\ &= 0.76 \text{ [m]} \cdot A \text{ [m}^2] \cdot 13.6 \cdot 10^3 \text{ [kgm}^{-3}] \\ &= 0.76 \cdot 13.6 \cdot 10^3 \cdot A \text{ [kg]} \end{aligned}$$

断面積 $A \text{ [m}^2]$ の上に乗る水銀の重力

$$\begin{aligned} &= \text{水銀の質量} \times g \\ &= 0.76 \cdot 13.6 \cdot 10^3 \cdot 9.8 \cdot A \text{ [kgms}^{-2}] \\ &= 101300 \cdot A \text{ [kgms}^{-2} = \text{N}] \end{aligned}$$

この値を、圧力の定義 式(V-3)の分子に使用して圧力を求めると、

$$\begin{aligned} \text{圧力} &= \text{面積 } A \text{ に加わる力 [N]} / \text{面積 } A \text{ [m}^2] \\ &= 101300A \text{ [N]} / A \text{ [m}^2] = 101300 \text{ [N/m}^2] \\ &= 101300 \text{ [Pa]} = 1013 \text{ [hPa]} \end{aligned}$$

圧力の単位のいろいろ

① [気圧] : 我々の生活の場地球表面の気圧を「1」とした圧力の単位[気圧,atom] 海底の圧力、高圧ポンベの圧力、に利用

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水銀柱を持って登山した Torricelli, 1608-1647 の名前に由来医療系で使用。1 気圧 = 760 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)、ただし、力の単位 [N]、面積の単位 [m²] とする。

圧力の単位の間の換算

$$\begin{aligned} \text{①気圧 atom} \quad \text{②mmHg(Torr)} \quad \text{③Pa} \\ 1 \text{ atom} = 760 \text{ Torr} = 1013 \text{ hPa} \\ = 101.3 \text{ kPa} \quad (\text{V-5}) \end{aligned}$$

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

— 圧力の測定 —
(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 $H_W \text{ [m]}$ の計算
ここで、水の密度は $1 \cdot 10^3 \text{ kgm}^{-3}$ 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

$$101300 = H_W \cdot A \cdot 1 \cdot 10^3 \cdot 9.8 / A \quad \text{となる}$$

H_W について解くと

$$H_W \text{ [m]} = \frac{101300}{10^3 \cdot 9.8} = 10.33 \text{ m}$$

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 $H_B \text{ [m]}$ 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 $= 1.04 \cdot 10^3 \text{ [kgm}^{-3}]$ とする
血液柱の場合、式 (V-3) を使って、

$$101300 = H_B \cdot A \cdot 1.04 \cdot 10^3 \cdot 9.8 / A$$

H_B について解くと

$$H_B \text{ [m]} = \frac{10.33}{1.04} = 10 \text{ m}$$

1 気圧に対応する血液柱の高さは 10 m 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、

$$10 \text{ m} \times 120 / 760 = 1.58 \text{ m} \quad \text{であり}$$

大人の背丈程度であることは興味深い

以上、まとめると

$$1 \text{ 気圧} = 760 \text{ Torr (水銀柱 760 mmHg)} \\ = \text{水柱 } 10.33\text{m} = \text{血液柱 } 10 \text{ m}$$

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 — 便利な道具の物理学 — (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
＋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

力と移動距離の積が一定であることを利用して、小さい力で移動距離を長くし、大きな仕事をする。

写真の道具はすべてこの原理を利用している。これらのことを理解しながら道具を使おう

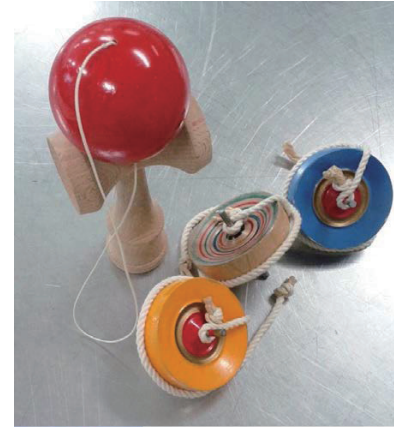
方法 道具を使って遊ぶこと

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 — 伝統的な子供の遊び — (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 地球コマ 逆さコマ



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

話しておきたいこと

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
そのまま走り続ける 等速直線運動
回転する物体の慣性の法則
コマを回して調べよう

床の上で回るコマは歳差運動をする
コマを床の上で回して歳差運動をみよう
床の上で回るコマには2つの力が作用する

1. コマの重心に働く下向きの重力
2. 床がコマ軸の下端を持ち上げる力
この2つの力による力のモーメント(トルク)が、コマに加わる。この回転力トルクによって、コマの回転運動が変化する

その変化とは回転軸の方向の移動である。この回転軸の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
やってみよう

掌(てのひら)の上で回転するコマを
中空に放り上げる、
空中にいる間だけ、歳差運動をしない
回転軸の方向は変化しない
地球が、そのよい例である

これこそ、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
回転体に当てはめた法則である

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[ms⁻¹]の二乗/曲率半径[m]

加速度と力の関係

押す人の出す力の大きさ:
乗る人の受ける力の大きさ:
両方とも乗る人の質量に比例する

力の大きさ比べ

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



頁128 温度計 湿度計

実験10 湿度の測り方

— 毎日定時測定 —
(第IV章A1, A3, A8, A9参照)

装置 乾湿温度計

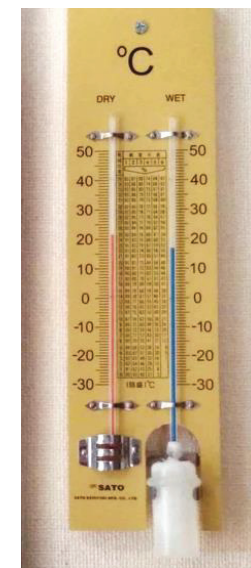
設置場所 室外ベランダ 目の高さ
風通しの良い日陰

目的 気温と湿度を測る

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
定刻に測定し記録する、測定者の署名

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 乾燥空気密度
(第II章17,第IV章A10,A12参照)



頁130 乾湿温度計

実験 1 1 おんさ 共鳴箱
— うなり —
(第 IV 章 D 1、D 2、D 5 など参照)

装置 おんさ ラの音 振動数 440 Hz
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 1 2 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
強力ニオジウム磁石
弾まないゴムまり

関連して話しておきたいこと

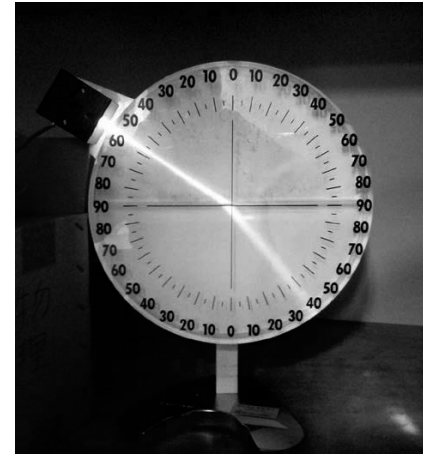
最近の物質物理学の研究の成果
新しい機能を持つ物質の開発
便利で機能を持つ物質の創造
薄膜製造技術の発達
エネルギーの節約

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 1 3 水による光の屈折
— 水中の光速は遅くなる —
(第 IV 章 D 1、D 6、D 7 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
関係式を調べよ
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
全反射を利用して反射の法則を知る

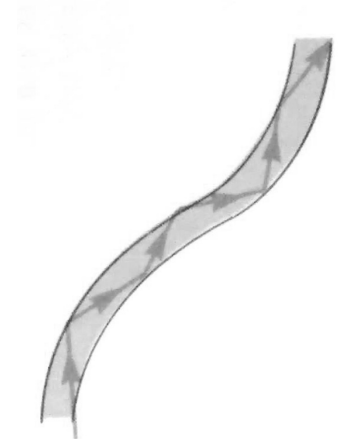
関連して話すこと

赤色光 緑色光の光路の違いを観る

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？
そのための、重要な技術はなにか？



頁 175 グラスファイバー
光の全反射

実験 1 4 虹の見え方

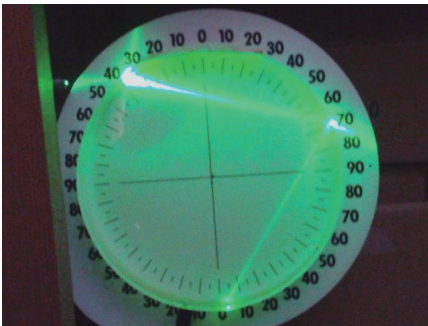
— 虹は七色 —

(第 IV 章 D 8 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

ある色の光だけが眼に入る時に、
その色が見える

これは、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 1 5 CD 分光器

— 色がキラキラ —

(第 IV 章 D 9 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



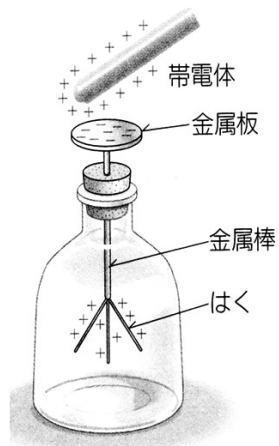
目的 電気の源を知ること
電気の持つ性質を学ぶこと

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

— 方位磁石による磁場分布測定 —

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

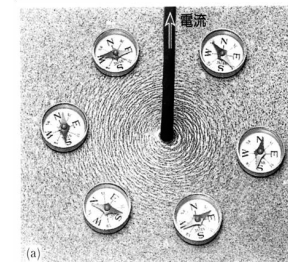
磁場は、棒磁石の N 極から出て
棒磁石の S 極に戻るように
分布する
その磁場を一本の線で繋ぐ
この線を磁力線と呼ぶ
砂鉄をばらまくと磁力線がよく分かる
磁力線の密度は、磁場の強さとしてよい

実験 18 電流の周りの磁場

— 電流は磁場を作る —

(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

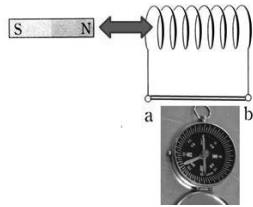
話しておきたいこと

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
— 現代文明の根幹 —
(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 図で棒磁石を動かすと、コイルに起電力が発生し、抵抗線 ab に電流が流れ、方位磁石の針が振れる。棒磁石の動く方向が反対になると方位磁石の針が逆に振れる。

方法 コイルに棒磁石を出し入れすると、端子 ab に豆電球を繋ぐと点灯する。端子 ab に繋いだ導線に電流が流れる。方位磁石の針の振れと棒磁石の動きとの関係を調べる。

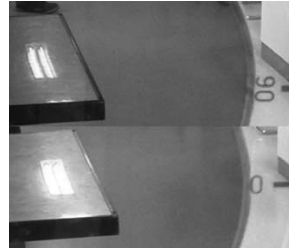
関連して話すこと

発電量を多くするには、電線位置での磁場変化を大きくするとよい。

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
— 立体メガネ —
(第 IV 章 E6、E7 など参照)

装置 偏光板 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 の偏光板を通過した光を第 2 の偏光板で観察する。第 2 の偏光板を板面内で回転させる。回転位置によって明暗が生じる。

偏光板による反射光の観察、窓から差し込む光が、机の上面で反射すると、その反射光は偏光している。このことを、偏光板を使って観察する、反射の角度に依って偏光の量が変化する。

関連して話すこと

光の本質と電磁波
電磁波の成り立ち
電磁波の種類

第 V 章 物理学実験のテーマと解説 練習問題

[問題 V, 1] アルキメデスの原理と呼ばれる法則がある。教科書「V 実験 3」を読んで、この法則に関する以下の問題に答えよ。

- 問題 V, 1-1. どのような現象に関する法則か、その現象について述べよ。
問題 V, 1-2. なぜそのような現象が起こるか、その原因は何か、そしてそれは、どのようになっているかを説明せよ。
問題 V, 1-3. 水中の物体の体積と、その物体の水中での重さの間には、どのような関係があるか、言葉で説明せよ。

[問題 V, 2] 圧力は面積当たりの力で定義される。よく使われる圧力の単位は三種類ある。

それらは、 [atom 気圧]
[mmHg トル]
[Pa パスカル] である。

教科書「V 実験 4」を読んで、次の問題に答えよ。

- 問題 V, 2-1. この三種類の圧力の単位の定義を述べよ。
問題 V, 2-2. 三つの単位の換算を記述せよ。
問題 V, 2-3. トリチェリーの実験について図を描いて説明せよ。
問題 V, 2-4. 針で刺されると非常に痛い、何故か理由を説明せよ。

[問題 V, 3] 水槽または湯船の底は、実際より浅く見える。これは光が、空中から水中に進むとき、あるいは逆に、水中から空中に出る時、その速度が変化し、進行方向が水中と空中で異なることによる。この現象を光の屈折現象と呼ぶ。教科書「V 実験 13」および「IV D7」を読んで、光の屈折について、以下の問題に答えよ。

- 問題 V, 3-1. 我々の身近に起こる光の屈折現象を、2 つ例を挙げて説明せよ。
問題 V, 3-2. 光が空中から水中に進むとき、その進む方向が変化する。この時の光の通る道筋(光路)はどうか、おおよその道筋を図に描いてみよ。
問題 V, 3-3. 前問題で、入射する光の方向が違った場合、光の通る道筋(光路)はどのように変わるか、おおよその道筋を、違いが分かるように、図に描いてみよ。
問題 V, 3-4. 描いた図の、入射角と屈折角と光の屈折率の間に、どのような関係があるか、記述せよ。
問題 V, 3-5. 屈折率が大きい時、これまでの図をどのように変化させればよいか、違いがよく分かるように図に描いて答えよ。
問題 V, 3-6. 全反射現象について説明せよ。

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

第 VI 章のまえがき

この章では、毎年行われてきた**国家試験の問題**を取り上げました。もちろん物理学に関する問題だけを選びました。2012 年度から 2017 年度の 6 年間で収録しました。

選択は私が行ないました。物理学に関連すると認められる問題を選びました。

純粋に、物理学の知識を問う問題から、人体の構造に関わること、機能にかかわること、エネルギーに関連することなど、範囲が広く、多岐にわたっています。

電氣的パルスの信号から伝達速度の計算、心電図のチャートから心拍数の計算、体に加わる力の計算、つり合いのこと、回転モーメント（トルク）の問題、やせるための食事制限量の計算、基礎代謝量に関して、有酸素運動の酸素量の計算、運動時の消費エネルギーの計算、代謝当量（単位 METs）の計算、光の照射強度の問題など、人体に関わる重要な問題が圧倒的です。

物理学が、いかに範囲が広くしかも重要な働きをしているかが分ります。いつでもどんな困難な問題に出くわすか、予想はできません。

まず**問題**を、**国家試験**に出されたそのまま書き写しました。複雑な図は、コピーまたは接写させてもらいました。解答は全て、5 つの選択肢から、1 つまたは複数個の正解を選ぶ形式です。

つづいて、**解説とコメント**の欄に、私が解いた経過と推論を、その順序で番号をつけて記述しました。

この時、解答者が使うべきもろもろの知識と推論を、できるだけ読者に寄り添う形で、順序良く並べたつもりです。

選択肢の中の記述が、正解のヒントになることがあります。知らない単語が出題された時には、記述された文章や、解答から「単位」をヒントにして、その意味を推論しました。白状すると、私はこの方法で知らない言葉をいくつか学びました。

問題の文章には不満足なものもあります。

「重さ（重力）」と「質量」の混同は、日本中どこにでも誰にでもあります。物理学教育上の最大の困難です。英語では「weight ウェイト重さ」と「mass マス質量」と、明確に区別されています。日本語ではどちらも「重さ」です。困ります。

「重さ（重力）」は力であり、「質量」は物質の量を表します。今の学校教育の場では、「重さ重力など力」の単位は、N ニュートン $[\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$ を使います。物質の量を表す「質量」の単位は $[\text{kg}]$ を使います。

日本語の持つ言葉の混乱は、1960 年の SI 国際単位系の世界条約締結以前に、物理学を習った人に大きいようです。

SI 国際単位系では、質量の単位は kg キログラム、長さの単位は m メートル、時間の単位は s 秒です。これらが基本になって、力の単位は N ニュートンです。

国際的に通用する国家試験の問題であってほしいと、切に願っています。

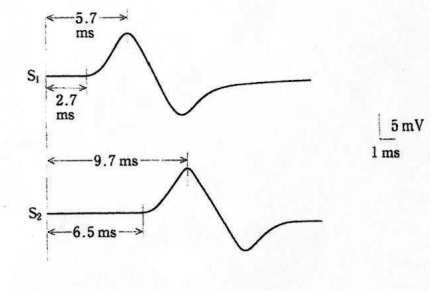
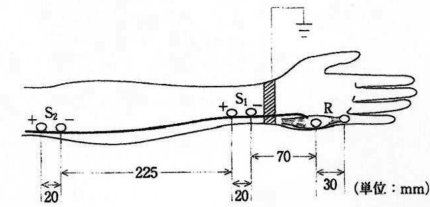
第 47 回 2012 年度

1. 2012 P T 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. 出題中の単位：mm ミリメートル
ms ミリ秒、m/s メートル毎秒
2. 運動神経伝導速度は、伝導距離の差を伝導時間の差で割ればよい
3. 答は、小数第 2 位で四捨五入することが求められている。単位が異なると数値が変わり、小数点の位置が変化するので、注意すること

4. この問題では解答欄から推察して、単位を、距離メートル m、時間秒 s で計算するのがよい
5. 伝導距離の差 = $S_2R - S_1R = S_2S_1$
= $225 + 20 = 245 \text{ mm} = 0.245 \text{ m}$
6. 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
7. 伝導時間の差 = $6.5 - 2.7$
= $3.8 \text{ ms} = 3.8 \times 10^{-3} \text{ s}$
8. 運動神経伝導速度 = $0.245 / (3.8 \times 10^{-3})$
= $245 / 3.8 = 64.47 = 64.5 \text{ m/s}$ (答)
9. 問題で与えられた測定値の有効数字は 2 桁で、解答を 3 桁要求しているのは、常識的ではありません。
10. なお、問題文中「少数」は、「小数」の誤りである

2. 2012 専基午前 6 9

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：力は加速度に比例する
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
力のモーメントの大きさは、回転中心から力の作用線に下した垂線の長さ、力との積で決まる。大きさだけでなく、回転する向きも重要である。

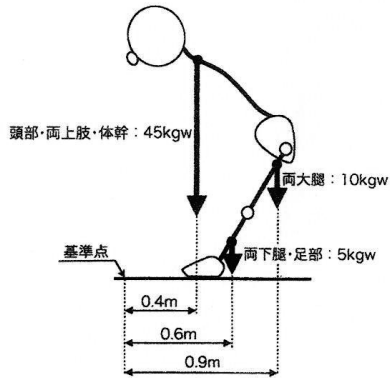
4. 正：運動のエネルギーは、質量と速度の2乗の積の2分の1である
5. 誤：水平な面上に乗る物体の水平面との摩擦力は、物体がその面に加える力の鉛直分力に比例する。
6. ただし、5.の問題文で、摩擦力は、物体が接触面に加える力の、平行分力と垂直分力に分けて考えるのが正しい。水平分力と鉛直分力に分けて考えるのではない
7. 傾斜した面上に静止する物体の摩擦力について、どのように解析するか考えてみてください。

3. 2012 専基午後 7 3

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

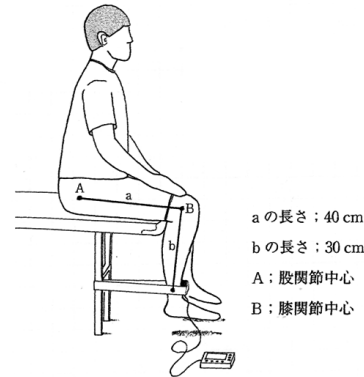
- 1 1. 重量の単位 kgw を最近では使用しない高等学校でも教えない。力の単位 N を使うと以下のようなになる
- 1 2. 重量 1 kgw = $1 \times g$ [N] = 9.8 [N] ただし、 $g = 9.8$ である
- 1 3. 重量 60 kgw = $60g = 588$ [N]
- 1 4. 重量 45 kgw = $45g = 441$ [N]
- 1 5. 重量 10 kgw = $10g = 98$ [N]
- 1 6. 重量 5 kgw = $5g = 49$ [N]
- 1 7. すべての、 $g = 9.8$ を掛け算するだけであるから計算しなくても、 g と書くだけでよい。すべての項にかかるので g で割ると、9. と同じ式になる

第 4 8 回 2013 年度

1. 2013 P T 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] の定義を、解答欄数値の単位から推察する。
体重比モーメントとは、自分が出した力のモーメントを自分の質量で割ったもの、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である。
2. 力のモーメントは図より、 $b \times 150$ N である。よって、体重比モーメント
= $b \times \frac{150}{60} = 0.3 \text{ m} \times \frac{150 \text{ N}}{60 \text{ kg}} = 0.75 \frac{\text{Nm}}{\text{kg}}$ (答)
3. 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

4. 理由は、力の単位 N の組み立て単位が $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ であるからである
5. この問題中に与えられた長さの単位は、cm であるので、m に換算すること
6. 一つの問題の中で、単位が統一されて出題されることが望ましい

2. 2013 P T 午前 2 0

問題

20 歳の男性。膝関節伸展運動を等速性に行なった。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

解説とコメント

1. 答欄に単位 W が無い
2. トルク：力のモーメントのことで単位は Nm
3. 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、 $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ であり単位 $[\text{度} \cdot \text{s}^{-1}]$ は、普通は使わない
4. 一般に平面角は、以下の式で定義される
平面角 = $\frac{\text{平面角に対応する円周の長さ}}{\text{その円の半径}}$
この平面角の単位がラジアン 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。従って、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
 $\pi \text{ rad} = 180 \text{ 度}$

ここで、 $\pi = 3.14159 \dots$ 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**：現代物理学用語にはないが、指定の単位がW(ワット)であることから、**仕事率**を意味するとしてよい

7. **仕事率**は1秒間にする仕事のことであり、1秒間に出すエネルギーである。
単位は $\text{J} \cdot \text{s}^{-1} = \text{W}$ である

8. 以上を考慮すると、問題の意図は以下の通りである

9. 「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」

10. 1秒当たりの回転角(角速度)を ω [rad·s⁻¹]とおくと、その値は
 $\omega = 30\pi/180 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} = \pi/6 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ (1)

11. トルク T [Nm] について
 $T = \text{回転半径 } R \text{ [m]} \times \text{力 } F \text{ [N]}$
 $= R \text{ [m]} \times F \text{ [N]}$ (2)

12. 足の移動速度 v [m·s⁻¹]について
 $v = \text{回転半径 } R \text{ [m]} \times \text{角速度 } \omega \text{ [rad} \cdot \text{s}^{-1}]$
 $= R \text{ [m]} \times \omega \text{ [rad} \cdot \text{s}^{-1}]$ (3)

13. 仕事率 P [W]について
 $P = \text{足の移動速度 } v \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \times \text{力 } F \text{ [N]}$
 $= v \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \times F \text{ [N]}$ (4)

14. 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·s⁻¹] に式(3)を代入すると
 $P = R \text{ [m]} \times \omega \text{ [rad} \cdot \text{s}^{-1}] \times F \text{ [N]}$ (5)

15. 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
 $P = \text{トルク } T \text{ [Nm]} \times \text{角速度 } \omega \text{ [rad} \cdot \text{s}^{-1}]$
 $= T \text{ [Nm]} \times \omega \text{ [rad} \cdot \text{s}^{-1}]$ (6)

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、 $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ であること

16. 問題文より、式(6)の T に150 Nmを ω に式(1)の数値 $\pi/6 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ を代入して

$$P \text{ [W]} = 150 \text{ Nm} \times \pi/6 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$= 25\pi \text{ J} \cdot \text{s}^{-1} = 25\pi \text{ W} \quad (7) \text{ (答)}$$

17. 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. 2013 P T 午前 4 3

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。

1. 極超短波療法
2. 超短波療法
3. 超音波療法
4. 干渉波療法
5. 低周波療法

コメント

1. 極超短波および超短波は、テレビ放送に用いられる電波の呼び名である。
2. 超音波診断には、通常3 MHzの音波が使われる。医療における治療に使われる超音波について調べて下さい。
3. 干渉波療法
4. 低周波療法
5. 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波とかを指定しなくてよいのでしょうか

4. 2013 P T 午前 4 6 および 4 7

問題文中に、圧力の単位として、

[トル Torr (mmHg)]と
 [パスカル Pa (Nm⁻²)]が、

使用されました。

解説とコメント

1. これらの圧力の単位間の換算：

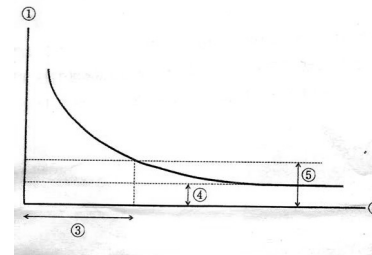
1 気圧 atom = 760 トル Torr or mmHg
 $= 101300 \text{ パスカル Pa}$
 $= 1013 \text{ ヘクトパスカル hPa}$
 $= 101.3 \text{ キロパスカル kPa}$

2. 問題文中に、単位間の換算は
 $20 \text{ kPa} = 150 \text{ mmHg}$ と指示されています。将来を見据えた良い判断です。

5. 2013 P T 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

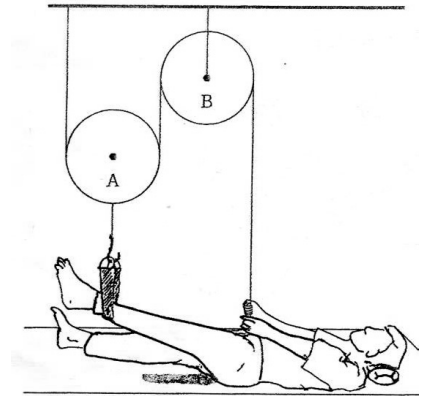
1. 筋の電気刺激特性の横軸は時間である
2. **基電流 時値** は物理学の用語にはないが、専門分野では使用されているのであろう、覚えるしかない

6. 2013 P T 午後 2 0

問題

患者が床面から20 cm鉛直拳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8 kgで、滑車と紐の重量および摩擦力は考えなくてよい。
 床面から下肢を拳上するために、上肢で引き下げた紐の長さとして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**：つり合いの状態では、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 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 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**が等しい
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して仮に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
- $$F_A = 8 \text{ kg 重} = 8 \cdot 9.8 \text{ N}$$
- $$F_B = 4 \text{ kg 重} = 4 \cdot 9.8 \text{ N}$$
- 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、 $L_A = 20 \text{ cm} = 0.2 \text{ m}$ の時
- $$L_B = 40 \text{ cm} = 0.4 \text{ m}$$
- である
11. それぞれの仮想の仕事を計算すると
- $$W_A = 8 \cdot 9.8 \cdot 0.2 = 1.6 \cdot 9.8 \text{ N}$$
- $$W_B = 4 \cdot 9.8 \cdot 0.4 = 1.6 \cdot 9.8 \text{ N}$$
- 確かに積は等しく、一定値である
12. 仮想的に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. 2013 P T 午後 4 8

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。

1. 1,000 kcal
2. 1,100 kcal
3. 1,200 kcal
4. 1,300 kcal
5. 1,400 kcal

解説とコメント

1. 1週間について考える。1日の消費量は2000 kcalだから1週間の消費量は $2000 \times 7 = 14000 \text{ kcal}$ 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 $200 \times 7 = 1400 \text{ kcal}$ だけ必要である
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だ
3. したがって、1週間の摂取量を $15400 - 7000 = 8400 \text{ kcal}$ 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 6 8

問題

基礎代謝率について正しいのはどれか。

1. 発熱時には増大する
2. 食物摂取後減少する
3. 男性より女性で高い
4. 加齢とともに増大する
5. 不安感があると減少する

「基礎代謝率(量)」について、正しく知識を持とう。

9. 2013 専基午前 6 9

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. $M = (F_1 + F_2)(a + b)$

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 6 9

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. 問題文中の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し測ろう
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[1,リットル]は、数値の1と混同され紛らわしい、注意しよう
4. 混乱を避けるため、ここでは、単位リットルには、[1]ではなく[l]を使うことにする
5. 酸素消費量を $A \text{ [ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}]$ 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 $[\text{ml}/\text{min}/\text{kg}]$ は、誤記である正しい表記は、 $[\text{ml}/(\text{min} \cdot \text{kg})]$ または、 $[\text{ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}]$ である以下、ここでは後者の表記を用いる
7. 歩行速度を $B \text{ [m} \cdot \text{min}^{-1}]$ とし、1分間当たりの歩行距離である
8. 問題中の A と B の関係は、次式である $A = B \times 0.1 + 3.5$ (1)
9. 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 $[\text{ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}]$ である
10. 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だろう
13. ただし、その人の質量(体重) 1 kg 当りに換算した、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、
 $3.5 \text{ mℓ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1} \times 60 \text{ kg} \times (60 \times 24) \text{ min} \cdot \text{day}^{-1}$
 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
 $4.825 \text{ kcal} \cdot \text{ℓ}^{-1} \times 300 \text{ ℓ} \cdot \text{day}^{-1} = 1460 \text{ kcal} \cdot \text{day}^{-1}$ 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
 上の推論は間違っていないようである
20. 次に、式(1)の定数 0.1 について考える
 定数 0.1 の単位は A/B の単位と同じである
 A/B の単位 = $[\text{mℓ} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}] / [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] = [\text{mℓ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}]$
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、この人の質量 1 kg 当りに換算したものである。
22. この値の由来は分からないが、統計的的平均的な値であろう。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。

$$A = 70 \cdot 0.1 + 3.5 = 7.0 + 3.5 = 10.5 \text{ mℓ} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3)$$

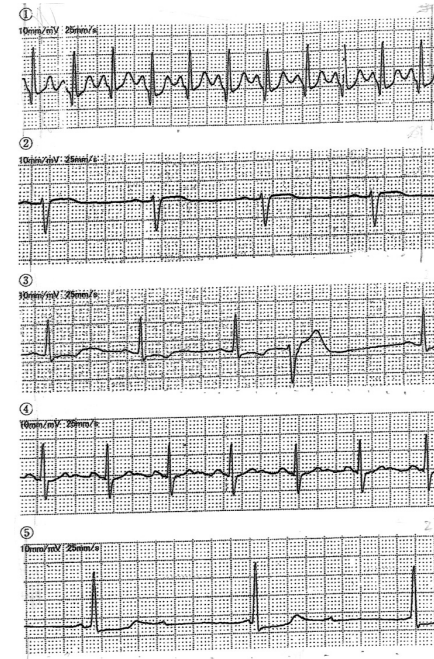
- 基礎代謝量の約 3 倍である
24. 質量が 60 kg の人の場合、酸素消費量は 1 分当たり、
 $10.5 \text{ mℓ} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1} \times 60 \text{ kg} = 630 \text{ mℓ} \cdot \text{min}^{-1} = 0.63 \text{ ℓ} \cdot \text{min}^{-1}$
 25. この時の消費エネルギーは、式(2)より
 $0.63 \text{ ℓ} \cdot \text{min}^{-1} \times 4.825 \text{ kcal} \cdot \text{ℓ}^{-1} = 3.04 \text{ kcal} \cdot \text{min}^{-1} \quad (4)$
 26. 歩行を継続して 80 kcal を消費するには
 $80 \text{ kcal} / 3.04 \text{ kcal} \cdot \text{min}^{-1} = 26.3 \text{ min}$
 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 (答)
 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：
 $70 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ で、1 秒間 2 歩とする
 1 分間で 120 歩だから 1 歩の歩幅は、
 $70/120 = 0.583 \text{ m}$ 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 万歩の歩行をすると
 $10000 / 120 = 83.3 \text{ min}$ 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
 $83.3 \text{ min} \times 3.04 \text{ kcal} \cdot \text{min}^{-1} = 253 \text{ kcal}$
 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 4 9 回 2014 年度

1. 2014 P T 午前 1 9

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 100/分未満であるものはどれか。



1. ①
2. ②
3. ③
4. ④
5. ⑤

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：10 mm/mV
 横軸：25 mm/s

2. 心電図の横軸は時間、縦軸は電圧である。時間の経過と共に電圧がどのように変化するかをグラフに示されている。
3. 心電図のグラフでは、鼓動脈拍の時間間隔を測定するため、横軸が時間である。1 秒がチャートの長さで 25mm に当たるこの場合、1 s/25 mm と表記するのが普通である、が、心電図のグラフでは、逆になっている。
4. 心電図のグラフの縦軸は、1 mV がチャートの幅 10mm に当たることを示している。普通は、測定電圧を分子に、対応する紙長さを分母にして、1mV/10mm と記述する。しかし、横軸に習って逆数にしたのであろう。
5. 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
6. 心拍数を二通りの方法で計算した

第 1 の場合

7. 横軸は、5 mm 毎の太線 20 間隔が、100 mm である
8. よって、太線 20 間隔の走査時間は
 $\frac{100}{25} = 4 \text{ s}$ である
9. 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

10. パルス数	脈拍
① 10 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 精度を上げる

11. 横軸は、5 mm 毎の太線 22 間隔が 110 mm である
12. 太線 22 間隔の走査時間は $\frac{110}{25} = 4.4$ s である
13. 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
14. パルス数 脈拍
- ① 11 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 $\frac{3 \times 60}{4.4} = 3 \times \frac{30}{2.2} = 41$
15. いずれの計算でも、心拍数が 75/分以上 100/分未満になるのは、④である。(答)
16. 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

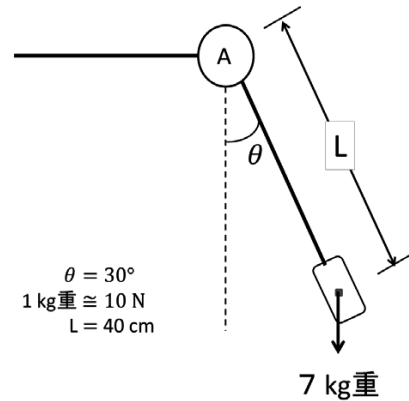
2. 2014 P T 午前 2 0

問題

図のように、棒の先に 7 kg 重の錘を付けた。

このときの A にかかるトルクはどれか。ただし、棒の重量は無視できるものとする。

1. 7 Nm
2. 12 Nm
3. 14 Nm
4. 21 Nm
5. 25 Nm



解説とコメント

1. トルク：力のモーメントのこと、英語で torque。支点から、力の作用線に下した垂線の長さ、力の大きさの積、この時、この力による回転が、時計回りか反時計回りかを区別しなければならない
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 $\theta = 30^\circ$ だから、支点（図の A）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、点 A の周りのトルク T は、 $T = L/2 \times W$ である。回転方向は、時計まわりである。
5. この式に $L = 40 \text{ cm} = 0.4 \text{ m}$ と $W = 7 \text{ kg 重} \cong 70 \text{ N}$ を代入すると、 $T = L/2 \cdot W = (0.4/2) \cdot 70 = 14 \text{ Nm}$ (答)
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、棒の先に重さが 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、 $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 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 6 9

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. $m \cdot L$
2. $m \cdot g \cdot H$
3. $m \cdot g \cdot L$
4. $m \cdot g \cdot \sin\theta \cdot H$
5. $m \cdot g \cdot \cos\theta \cdot H \cdot L \cdot \sin\theta$

解説とコメント

1. 重力加速度 g をここでは、 g と記述しよう。単に、物理量をイタリックで表記

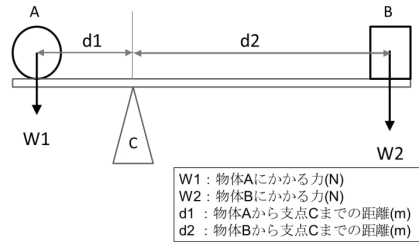
- したいからである。以下他の文字も同じ
2. この解答欄には単位がないことを異様に思う受験生がいるかもしれない
3. しかし本来、物理量を文字で表す場合、文字の中に単位も含まれている。物理学の教科書などにおける記述の約束である。
4. 他方、数値で表す時は必ず、単位を記述しなければならないことは当然である。
5. ですから、この問題に不備はない。
6. 答は mgH である。その理由は以下の通りである。仕事量 W は、加えた力 F と動かしその方向の距離 L の積である
7. この問題の場合、力 F は、 $F = mg \cdot \sin\theta$ である
8. 距離 L と高さ H 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
9. 従って力 F と長さ L の積は、 mgH
10. 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、計算をしなくても答えが mgH になることが分かる
11. ただし、初めの高さが 0 m 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ているとありがたい。

第50回 2015年度

1. 2015 専基午前 6 9

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



1. $W1+W2$
2. $d2 \times W2/d1$
3. $d1 \times W1/d2$
4. $d1 \times W1+d2 \times W2$
5. $d1 \times W2+d2 \times W1$

解説とコメント

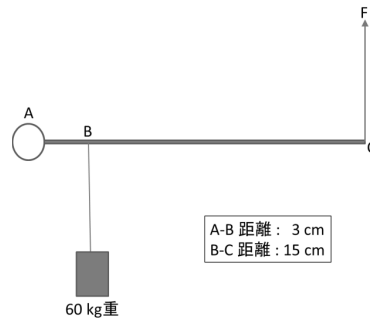
1. てこのつり合いの条件は、
 条件 1. 合力が 0 であること
 条件 2. 回転しないこと、つまり、時計廻り(右回転)の力のモーメントと反時計廻り(左回転)の力のモーメントとが、等しいこと
 この二条件が同時に成り立つことである
2. この問題は、条件 1. の合力についての問題である。したがって、支点 C で、てこに加わる力が上向き $W1+W2$ であれば合力は 0 となる (答)
3. てこが釣り合う条件は、てこに加わる力のすべてを考慮する必要がある。設問の「物体 A にかかる力 $W1$ [N]」という文章は適切ではない。「物体 A がてこを押す力 $W1$ [N]」とするとうい

4. 物体 B についても同様に、「物体 B がてこを押す力 $W2$ [N]」とするとうい
5. 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. 2015 P T 午後 1 9

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。



1. 60 N
2. 80 N
3. 90 N
4. 100 N
5. 120 N

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、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の力の大きさの積である
3. A 点の周りの時計廻り(右回転)の力のモーメントは、 $3 \text{ cm} \times 60 \text{ kg 重}$
4. A 点の周りの反時計廻り(左回転)の力のモーメントは、 $18 \text{ cm} \times F$ [N]
5. これらを等しいと置くと
 $3 \text{ cm} \times 60 \text{ kg 重} = 18 \text{ cm} \times F$ [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 を消して、さらに、両辺を 18 で割ると
 $(3 \times 60)/18 \text{ kg 重} = F$ [N] となる。
 残る単位は残して、計算すると、
 F [N] = 10 kg 重 = 10000 g 重

7. ここで、与えられた換算 100 g 重 = 1 N を使うと、 F [N] = 100 N となる (答)
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 kg 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、 $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 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

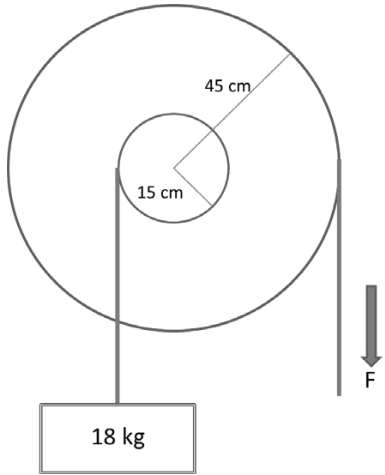
1. 2016 専基午前69

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）。

ひもを引く最小限の力 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. 1,620 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について考える
2. 小輪に加わる力は、重力加速度を g とすると

$$18\text{ kg} \times g [\text{ms}^{-2}] = 18\text{ g} [\text{N}] \quad (1)$$

3. 力のモーメントは、反時計廻りに

$$0.15\text{ m} \times 18\text{ g} [\text{N}] \quad (2)$$

4. 大輪に加える力を、 $F[\text{N}]$ とする
5. 大輪に加わる力のモーメントは、時計廻りに

$$0.45\text{ m} \times F [\text{N}] \quad (3)$$

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

$$0.15\text{ m} \times 18\text{ g} [\text{N}] = 0.45\text{ m} \times F [\text{N}]$$

F について解くと

$$F [\text{N}] = \frac{0.15 \times 18\text{ g} [\text{N}]}{0.45} = 6\text{ g} [\text{N}] \quad (4)$$

7. ここで、 $100\text{ g} = 0.1\text{ kg}$ の物体を引き上げるのに必要な力は

$$0.1\text{ kg} \times g [\text{ms}^{-2}] = 0.98\text{ N} \approx 1\text{ N}$$

と近似するので、

$$1\text{ kg} \times g [\text{ms}^{-2}] \approx 10\text{ N} \quad \text{となり}$$

式(4)より $F = 6\text{ g} \approx 60\text{ N}$ である

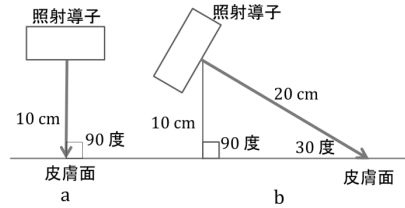
8. 重力加速度 $g = 9.8$ を 10 とする近似は、重力に関する理解を妨げる場合がある。注意が必要である
9. 力の単位 N の組立単位は、 $\text{N} = \text{kgms}^{-2}$ であり、計算に使用する長さや質量の単位は、それぞれ m メートル、 kg キログラムと秒でありたい。出題にもこれらの単位を使うと無駄な複雑さがなくなる。
10. 受験生に混乱を与えないために、問題作製を単純にしたい。

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る
2. b の距離は a の距離の 2 倍であるから強度は $1/4$ になる (1)
3. 次に、受光面の方向が斜めになればなるほど、弱くなる。それは、受光面積が広くなるからである
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 ($\cos\theta$) に比例する
5. θ が 0° の時、真正面から受光し、受光面積が最小になる。光は最も強い。この時 $\cos\theta = \cos(0) = 1$ である。
6. θ が大きくなり 90° に近づくと、斜めに光が当たり、受光面積が大きくなる。この時、光は弱くなる。 $\cos\theta$ の値は小さくなる。
7. この問題では、皮膚面の法線方向と光のなす角は $\theta = 60^\circ$ であり、次式となる

$$\cos 60^\circ = 1/2 \quad (2)$$

8. (1)と(2)を合わせて $1/8$ となる (答)

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

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）、

$$3.5\text{mL} \cdot \text{kg}^{-1}\text{min}^{-1} \quad (2)$$

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 $890\text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ であるので、体重（質量） 1 kg 当りに換算すると

$$\frac{890\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}}{50\text{ kg}} = 17.8\text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}\text{kg}^{-1} \quad (3)$$

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

$$\text{代謝当量} = \frac{17.8}{3.5} = 5.09\text{ METs} \quad (\text{答})$$

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としてよい。

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 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」

このことを使うと、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

$$\text{基礎代謝量} = 60 \times \frac{3.5}{1000} \times 4.825 \times 60 \times 24$$

それぞれの数値の単位を記述すると

$$\frac{\text{kcal}}{\text{day}} = \text{kg} \cdot \frac{\text{mL} \cdot \text{kg}^{-1}\text{min}^{-1}}{\frac{\text{mL}}{\text{l}}} \cdot \frac{\text{kcal}}{\text{l}} \cdot \frac{\text{min}}{\text{h}} \cdot \frac{\text{h}}{\text{day}}$$

数値と単位を計算すると、次の通りです

$$\text{基礎代謝量} = 1460\text{ kcal/day}$$

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」と言う言葉はありません。
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. 解答4. は、必要条件であり、十分条件ではない

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、初めての学生さんの中の2人です。研究室を創るための苦勞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や、その他、教育学部や工学部の学生を対象とした講義です。

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。

この種の講義では、式を使わず、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」との口実で、真実からはずれる場合があります。

私は「優しい物理学」を執筆するにあたって、心に決めたことがあります。「分かり易く記述するけれども、決して、真実からはずれない」ことです。

そのため分かり易い記述を求めて、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せん。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す。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

Web 版へのあとがき

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。「優しい物理学」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。そして早急に出版することを勧めてくれました。

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。5倍10倍と拡大しても、字が鮮明に読み取れるようにすることを目指すこと、その方法を教示してくれました。おかげで図の品格が向上しました。

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。ありがとうございます。

2017年4月17日

出版と第二版へのあとがき

2019年4月の講義に間に合わせて製本し印刷しました。

一冊の書物を出版することのむずかしさを体験しました。特にISBN番号の取得に尽力して下さった仁多学園に深く感謝します。

この書物を、学校法人仁多学園島根リハビリテーション学院新1年生の4月からの物理学講義の教科書として使いました。高等学校を卒業したばかりの、若い学生、ほとんどが高等学校で物理学を履修していない学生が、この書物を読んで理解できるかどうか、授業数が少なく、十分に説明をする時間がありません。

この本は誰が読んでも分かるように、優しく書いたつもりです。そこで、私は私に試練を課しました。物理学を習ったこともない人が読んで、理解できるか、「優しい物理学」は、その試練に耐え得るか、試みることにしました。

この年4月の入学生64名、各々に、ほぼ1節づつを担当してもらい、その内容をポスターにまとめ、教室の仲間達に語ってもらうことにしました。

不満の声もありましたが、多くは肯定的なものでした。読んで楽しかった、知らないことを知れてよかった、もっと読んでみようと思ったなどです。

もう少し学生の感想を続けます。

自ら調べ、考え、理解しようとしたことで、きちんと理解することの良さ楽しさを知りました。これまで知らなかったことを知る喜びを味わいました。これからの生活に生かせるかもしれないと感じ、もっと深く理解したいと思う心が芽生えました。

自分でまとめて、友の前で語ることは、頭にしっかり入れること、自分の言葉に言い替えることであり、これは自らへの定着であり、なにが重要なポイントであるかを探し出すことができました。理解が一層深まったと言えます。

分ることが増加したことによって、自分の得意ができ、喜びを感じ、さらなる知識を得る欲望が湧くのを感じました。

読んで理解し、その内容の深さに驚き、これまで知らなかった世界を学ぶことの楽しさを体験し、これが、苦手意識に打ち勝つことに繋がりました。

物理学と生活の繋がりを知り、楽しかっただけでなく、現在地球上で問題になっていることが多くあることを知り、心を痛めました。

自分で学ぶことのむずかしさを体験し、自分で解決法を模索すると、自然に頭に残ることが多くあり、解決することの喜びを味わいました。

ポスター作りに苦勞し、それだけ知識を増やすことができました。その上、他人に聴いてもらうことの喜びを体得することができました。

友人の話は分かり易く、頭によく入り、しっかり理解でき、知識が深まりました。同時代の人の言葉だからでしょうか。

知識を得ることの喜び
努力することの喜び
他人に話すことの喜び

これらを、生き生きと話してくれました。

これは私に大きな力を与えてくれました。私は意を強くしました。この本は読めばわかるのだ、知識が得られるのだ、と強く確信を持ちました。学生に厚く礼を言いたい気持ちでいっぱいです。

初版は予想外に多くの人々の手に渡りました。いくつかミスプリントがありました。記述に言葉足らずの部分もありました。

これらを訂正しました。主な加筆は、「第 IV 章 E. 電気・磁気そして電磁波」です。N極・S極が磁気の素ではなく、**電流の磁気作用が磁気の素**であることを明確に記述しました。

各章に練習問題を付けました。再び、遠山昭雄さんに、点検をしてもらいました。ありがとうございます。

大学院時代の恩師 生嶋明先生 が初版を丁寧に読んでくださいました。その上、多くのコメントを頂きました。

説明や用語の重複、欠落、さらには、これらの順序立てなどをご指摘くださいました。曖昧な所には、物理学の厳密さを教えて頂きました。優しさとの調和を持たせる表現方法を模索しました。空白箇所にも挿入のアイディアも頂きました。

広島大学理学部の卒業生から「優しい物理学」を読んだ感想をもらいました。松田修司さんです。山口県で高等学校物理学の教師を続けています。ミスプリントだけでなく、高等学校の教育や教科書との違いを教えてくださいました。

そして、「優しい物理学」は、自分が学生時代に聴いた「私の講義」の雰囲気そのままだと、ほぼ半世紀昔を懐かしんでくれました。

また、取り上げた話題が多く、あれもこれも次の授業で使いたくなること、億年の地球の歴史で、消え去ったはずの放射性物質の製造してしまったこと、全地球規模での地球表面の温暖化のこと、など、無念さに共感し、

「物理学があたりまえの日常となって、人が、物理学を通して、その日常を見つめることができた時に、物理学は、大きな力になる」だろうと、

豊かな感想を便箋7枚に綴ってくれました。松田修司さんは、私の言いたいことを、心底読み取ってくれました。

多くの方々の励ましを得て、第二版の原稿を作り上げました。おかげさまで、印刷までこぎつけることができました。

2020年度の講義に間に合います。

2020年 1月25日

執筆にあたって参照した文献

- 1) 国立天文台編「理科年表」丸善
- 2) 「岩波理化学辞典」岩波書店
- 3) 藤原邦男著「物理学の序論としての力学」東京大学出版会
- 4) 山本義隆著「重力と力学の世界 —古典としての古典力学」現代教学社
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 朝永振一郎著「物理学とは何だろうか 上」岩波新書
- 8) 朝永振一郎著「物理学とは何か」みすず書房
- 9) 内山龍三著「相対性理論」岩波文庫
- 10) 佐々木祥介「特殊相対性理論」
「ホームページ」<https://sites.google.com/physicscomsasaki/>
- 11) 「半減期」<http://www.nde.jaea.go.jp/CN10/index.html>
- 12) 高木仁三郎著「原発の事故は何故繰り返されるのか」岩波書店
- 13) 「物理学辞典」培風館
- 14) 中川毅著「時を刻む湖」岩波科学ライブラリー
- 15) 浅井富雄監修「気象の事典」平凡社
- 16) 小倉義光著「一般気象学」東京大学出版
- 17) B. フェイガン著 東郷えりか訳「古代文明と気候大変動」河出書房新社

- 18) 内嶋善兵衛編 真鍋淑郎著「地球環境の危機」岩波書店
- 19) 林弘文 他 著「地球環境の物理学」共立出版
- 20) 砂川重信著「電磁気学」岩波書店
- 21) M. ミランコビッチ著 粕谷健二他訳
「気候変動の天文学理論と氷河時代」原著出版

事項索引

項目は教科書中で数行またはそれ以上の説明がなされているものを選んだ。また、各項目についてその内容を把握するうえで適切な頁を引用した。

あ	え
青色偏移 185	永久磁石 193
圧電性物質 217	SI国際単位系 29
圧力 19 123	S極 193 244
圧力伝達の法則 235	エックスX線 105 204
アボガドロ数 77 94	N極 193 244
アルキメデス原理 231	エネルギー/仕事 21 29
アルコール温度計 130	エネルギー保存則 81 127 235
アルゴンガス 119	エボナイト棒 189 243
α (アルファ)線/崩壊/粒子 89	LED電灯 179 242
アルベド数 218	円運動 47
アルミニウム箔 189 243	遠隔作用 194
安定同位体 67	炎色反応 144
アンペールの力 195	円電流 198 244
い	お
イオン 189	黄金の王冠 231
位置 44	オームの法則 191
位置エネルギー 258	オクターブ 172
1原子分子 126	オゾン(層) 122
引力(電荷)/(磁荷) 189 193	音 167
う	音の三要素 171
ウィーンの変位則 213	重さ(重力Weight) 18
ヴォストーク基地 121	おもちゃの物理学 236
宇宙/(船)/(飛行士) 14 18	おんさ 171 239
うなり 239	温室効果 120
ウランU235 94	音速 239
運動エネルギー 81	温暖化(気体) 120 221
運動神経伝達速度 248	温度 123 157
運動の法則 38	温度の基準点 141
運動量 43 248	音波 169

か	起電力 199 245
カーボンファイバー 239	凝固温度/熱 130 140 147 148
回転運動の慣性法則 236	凝縮温度/熱 130 140 148
海洋性気候 147	共存 139
ガウス法則(電場/磁場) 200	共鳴箱 239
核子 65	鏡面 177
核種一覧表 87 88	共有結合 150
角速度 250	極半径(地球) 15
核の結合(束縛)エネルギー 83	距離 29
核反応(分裂/崩壊/融合) 85 94	キログラム原器 79
核分裂生成物/FP 96	キロパスカルkPa 252
核分裂片 90	均質圈 117
火山噴火 223	近接作用 194
可視光線 204	金属 191 243
化石燃料 221	く
仮想仕事の原理 37 235 252	空気の密度 129
加速度 45 237	クーロン法則(電荷/磁荷) 193 194 197
カラスおどし 179	屈折率 176 240
ガラス棒 189 243	くの字型水分子 150 220
カリウムK40 105	組立単位 28
ガリレオ慣性法則 55 236	雲 238
カロリー 21 157	グラスファイバー 240
カロリック(熱素) 157	車いす 237
乾球 130	グレイ(単位) 90
乾湿温(湿)度計 130 238	け
がん死亡率/発症率 110	蛍光灯 179 242
慣性質量 27 80	形状記憶合金 239
慣性の法則 55	携帯電話 204
慣性力 52 54 237	毛皮 189 243
乾燥空気 129 238	夏至 16
γ (ガンマ)線 89 105 204	血圧測定 234
き	血液柱 234
気化(熱) 130 147	原子質量(単位) 64 65 67
気象衛星 133	原子大きさ(構造) 64
気体定数 22	原子爆弾 85 93 98
気体の状態方程式 123	原子(元素)番号 66
気体の一般的性質 123	

原子量	76	酸素	119
原子力エネルギー	81	酸素消費量	254
原子力発電	85 98		
元素周期表	64 68	し	
減速材	99	CD分光器	179 242
けんだま	236	シーベルト(単位)	108
検電器	189 243	塩(しお)	143
絹布	189	紫外線	122 204
		視角半径	178 241
こ		閾(しきい)値	111
コイル	198 245	仕事/エネルギー	37
高音	171	仕事率	21 158 251
光合成	107	磁石	195 244
恒星	14	自然の法則	17 43 196 209
光速(水中)	174 240	自然律音階	172
光速一定の法則	184	湿球	130 238
公転軌道面	13	湿度	129 238
公転周期	15	質量(Mass)	19 78
黄道12星座	12 13	質量欠損	78
交流電気	191 200	質量原器	78
合力	34	質量数	65
光路	175	質量保存則	82
極超短波治療	261	自転軸(地球)	13
固体/液体/気体	139	自動血圧測定器	235
古代ギリシャ	15	磁場(磁界)	193 195 244
コマ	236	磁場の単位	197
コリオリの力	33 133 134	シャルルの法則	123
		周期(波)	168
さ		重心	249
歳差運動	15 236	重水素/Dデュートリウム	66
サイフォン	228	自由電子	160
逆さゴマ	236	周波数	168 203
さがり	167	収率/フィッションプロダクト	96
砂糖	143	重力(重さWeight)	18
作用線	35 257	重力加速度 g	23
作用反作用の法則	56	重力質量	27 79
三重水素	104	ジュール熱	190
三重点	141	シュテファンボルツマン法則/定数	213

春分点	14	赤色偏移	185
昇華(温度)	140	赤道(面)	14
上昇気流	125	赤道半径(地球)	15
状態方程式	22 130	セシウムCs137	91 94
蒸発(熱)	140 147 148	絶縁体	160 191
心電図	256	石鹼	144
振動数	168	絶対温度	117 158
		潜熱	126 130 147
す		全反射	175 240
水圧	230		
水銀柱	232	そ	
水晶	176	相	139 147
水蒸気	120 128 219	相対性理論	27 80
水深	230	速度	38 44
水素結合	152	組織荷重係数	108
水素爆弾	85 103	粗密波	169 239
水柱	234	存在度	77
垂直構造(大気)	117		
水和	143	た	
スカラー(物理量)	38	大気	117
頭寒足熱	159	大気圏外	214
スケート	140	代謝当量	262
ストーブ	163	体重比モーメント	250
ストロンチウムSr89	96	体積	123
スネルの法則	240	体積抵抗率	192
スピカ	14	帯電(体)	189 243
スペクトル	179	台風	134
スマホ	204	台風のエネルギー源	135
すりこぎ運動/歳差	15	ダイヤモンド	176 240
		太陽の(温度/光)	12 179 209 242
せ		太陽のエネルギー源	103
西高東低	133	太陽光の大気による吸収	219
静止質量	80	太陽定数	211
静止質量エネルギー	81	太陽表面温度	214
成層圏	117 122 220	太陽表面有効温度	211 214
成層圏温度降下	220	太陽放射エネルギー	214
正電荷	189	対流	159
赤外線	204	対流圏	117 119

多原子分子	126	て	
縦ドブラー効果	184	低音	171
縦波	167 169 239	定常状態	122
だるまおとし	236	テレビ	204
単位	11 28	電圧/電位/電位差	190 191
誕生月	12	電荷	194
炭素C12	67	電荷保存則	199
炭素C14年代測定	106 107	電気回路技術	191
断熱変化(圧縮/膨張)	125 170 238	天気図	133
短波放送	204	電気双極子	151 220
		電気抵抗	190
ち		電気抵抗発熱体	192
力の単位(N)	11 52	電気伝導(度)	160 192
力のモーメント/トルク	35 236	電気の素	189 243
地球	12 209	天球	13
地球ゴマ	236	電気量	190
地球の温度	209	電子	64 189
地球の質量	24	電磁気学の基本法則	199
地球の自転軸	13	電磁波(電波)	159 201 203 204
地球の半径/メタボ	15	電磁誘導	191 199
地球のもらうエネルギー	218	電子レンジ	219
地球表面の温暖化	219	電信柱/でんしんばしら	204
地球表面の平均気温	211	天然ウランU	96
地球の放出エネルギー	218	天然放射性同位体/元素	67 86 105
地軸の傾き/23.5度	13	電場(電界)	193 194
窒素	119	電場の単位	194
窒素肥料	123	伝播(速度)	163 168
地熱	218	天文単位	216
チャップマン機構	122	電離層	118
中間圏	118	電流	190
中性子	65	電流の磁気作用	195 244
超音波診断	171 239	電力/単位W	21 158 190
超高純度	191		
直流電気	191 200	と	
		等圧線	133
つ		同位体/同位元素	66
月(軌道面)	15	同位体比	107
釣り合い(条件)	34 252 259	道具の物理学	235

同族分子	145	の	
融ける融かす	142	濃縮ウランU	98
溶ける溶かす	142	ノックス	123
ドブラー効果	179	暖簾(のれん)	167
ドライアイス	140		
トリチウム	66 104	は	
トリチェリー真空	232	バーナー	213
トルTorr	20 232	媒体	167
トルク/力のモーメント	35 246	箔検電器	189 243
		白熱電灯/電球	179 242
		薄膜製造技術	239
な		パスカルPa(単位)	19 232
長崎型原子爆弾	100	弾まないゴムまり	239
長さの単位	11 17	裸の地球	219
七色(虹)	177	波長	168 203
波	167	発光ダイオード/LED	239
波の速度	169	発電(所)	191 199 245
南中	26	発電用原子炉	98
		鼻先	163
に		バネ振動	39
ニオジウム磁石	239	場の考え方	194
2原子分子	126	速さ(速度)	38
二酸化炭素ガス	119 220 221 222	バリウムBa137	96
虹	177 241	ハレー彗星	51
二重虹	177	半金属	191
二百十日/二百二十日	134	半減期	67 92
入射角	240	反射角	240
		半導体	191
ね		反発力	193
熱	157	万有引力法則/定数	17 24
熱振動	153		
熱素(カロリック)	157	ひ	
熱伝導	160	ビオサバル法則	200
熱伝導度/伝導率	161	P-T状態図	139
熱の仕事等量	21 157	光	167 209
熱容量	131 145 158	光屈折(透過/反射)	175 240
熱容量キログラム/モル	146	光のスペクトル	179
年縞(ねんこう)	107	光の速度	80

光の本質	201	平均律音階	172
光ファイバー	239	平均律ピアノソナタ	173
非均質圏	117	平衡状態	122
被曝(ばく)放射線	109	平面角	29 250
被曝量	108	β (ベータ)星	14
微分積分学	49	β (ベータ)線	89 108
標準状態	125	ヘクトパスカルhPa	251
氷床コア	121	ベクトル	38
表面活性剤	144	ベクレルBq	90
広島型原子爆弾	99	ヘルツHz	168 200
		偏光(偏光板)	203 245
ふ		ほ	
不安定放射性原子核	96	ボイルシャルル法則	123
フィッシュンプロダクトFP	96	方位磁石	193 244
フェーン現象	131	崩壊確率	91
拭き掃除ぞうきんがけ	144	棒磁石	193 244
輻射(放射)	159	放射(輻射)	159 163
富士山頂	141	放射スペクトル	209 211
物質の三態	139	放射性原子核	86 98
物質物理学	191	放射性同位体	66 85
沸点(沸騰)	139 228	放射線	89
物理学の目的	228	放射線荷重係数	108
負電荷	189	放射線吸収線量	90 108
不導体	191	放射線実効線量	108
ブラウン運動	64	放射線等価線量	108
フラスコ	228	放射能	90
プランク放射法則/放射式	209 213	飽和状態	129
浮力	231	飽和水蒸気圧	128 238
プルトニウムPu239	94	歩行速度	254
フレミング右/左手法則	201	星占い	16
フロン系気体	123	北極星	13
分圧	128	炎	213
分光器	179 242	頬	163
分子量	145	ボルツマン定数	211
へ		ま	
平均半径(地球)	15	マイクロ波	204 219
平均分子量(大気)	119		

曲がる時の加速度	47 237	ら	
摩擦力	39 249	ラ音	239
マックスウェル方程式	199	rad(ラジアン)	47 250
マッチ棒	213	ラジオ	204
豆電球	245	ラジオアイソトープ	85
み		り	
水	130 139	離散型スペクトル	179
水の惑星	142	理想気体	22 124
密度	29 141	立体構造(氷結晶)	154
む		量子力学	213
麦わら帽子	163	良導体	191
め		臨界質量(臨界)	98 100
メネラウス	16	輪軸	261
メスシリンダー	230	れ	
も		レーザー光	240
モル(数)	29 94	レグルス	14
ゆ		劣化ウランU	100
融解(熱)	131 142 148	連鎖反応	98
融解点(融点)	140	連通管	235
よ		レンツの法則	200
溶解(度)	142	ろ	
陽子	65 189	ローレンツ力	201
容積比	117		
溶接	213		
ヨウ素I	131 94		
ヨーヨー	236		
横ドブラー効果	184		
横波	167		

人名索引

A

- Ampere, A.M.** アンペール フランス 1755-1836
8120年電流の磁気作用 195; アンペールの力の発見 197
- Archimedes** アルキメデス ギリシャ 288B.C.頃-212B.C.
浮力の発見 231

B

- Biot, P. J.** ビオ フランス 1774-1862
1820年ビオ・サバールの法則 電流の周りの磁場の一般的表現 200
- Boltzmann, L.** ボルツマン オーストリア 1844-1906
1879年放射エネルギーの温度4乗の法則の発見 213
- Boyle, R.** ボイル アイルランド 1627-1691
1660年ボイルの法則の発見 22, 123
- Brahe, T.** ティコブラーエ デンマーク 1546-1601
地球の歳差運動24800年周期 15
- Brown, R.** ブラウン イギリス 1773-1858
1828年水面上に浮かべた花粉が破壊して中から出てきた微粒子が不規則に動くことを発見した(ブラウン運動) 64

C

- Cavendish, H.** キャヴェンディッシュ イギリス 1731-1810
イギリスの科学者、多くの研究業績の大部分を発表しなかったことが惜しまれている。その業績は、水素ガスの発見・水素と酸素・水の合成・地球の密度の測定・気体の研究・後に発見されたクーロンの法則やオームの法則も、既に実験ノートにある。その名を冠したキャヴェンディッシュ研究所は、イギリスを代表する研究所である
- Charles, J.** シャルル フランス 1746-1823
1787年シャルルの法則の発見 22, 123
- Coriolis, G.G.** コリオリ フランス 1792-1843
1835年回転系(地球上)で移動する時に受ける慣性力(コリオリの力) 33;
回転体上で移動する時受ける慣性力 54; 西高東低で北風 133;
台風 134
- Coulomb, C.** クーロン フランス 1736-1806
1785年電荷間および磁荷間に働く力に関するクーロンの法則の発見 195

D

- Doppler, C.** ドプラー オーストリア 1803-1853
1842年光のドプラー効果 184; 後に音のドプラー効果 180

E

- Einstein, A.** アインシュタイン ドイツ 1879-1955
1905年特殊相対性理論 80; 1916年一般相対性理論 27, 79;
1905年ブラウン運動 64; 光のドプラー効果の計算 184;
1905年光量子仮説・量子論の祖 212; 人工元素名 9;

F

- Faraday, M.** ファラデー イギリス 1791-1867
1831年電磁誘導の発見・電場磁場の概念の発見 191, 199
- Fleming, A.J.** フレミング イギリス 1849-1945
電流によって発生する磁場の方向、および、磁場によって発生する電流の方向と、電線の移動方向の覚え方; 右手・左手の法則 201

G

- Galilei, G.** ガリレオ イタリア 1564-1642
慣性の法則 55; 振り子の等時性 56; 回転運動の慣性の法則 236;
実験と観察を重視し「科学の父」と呼ばれる

- Gauss, C.F.** ガウス ドイツ 1777-1855
電荷と電場・磁荷と磁場に関する法則の発見 200

H

- Hertz, H.R.** ヘルツ ドイツ 1857-1894
1888年電磁波の予言と実証・電磁波の命名 201;
周波数の単位 $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$ 30, 168
- Hipparchos** ヒッパルコス ギリシャ 190頃-120B.C.頃
宇宙の星座 12; 春分点の移動発見 14

J

- Joule, J.P.** ジュール イギリス 1818-1889
1840年ジュール熱 192; 1850-1878年熱の仕事当量の測定 21, 157;
エネルギー保存則; エネルギーの単位・組立単位 Nm 29, 37;

L

- Lavoisier, A.L.** ラボアジェ フランス 1743-1794
 酸素、水素、窒素命名 21; 質量保存則発見 157
- Lenz, E.H.** レンツ ロシア 1804-1865
 電磁誘導に関するレンツの法則の発見 200
- Lorentz, H.A.** ローレンツ オランダ 1853-1928
 1895年電磁場中の電気力学・特殊相対性理論の方程式群を導出 201

M

- Maxwell, J.C.** マックスウェル イギリス 1831-1879
 1861年電磁場の基本法則の整理 199
- Mendelejev, D.I.** メンデレーフ ロシア 1834-1907
 1869年元素を並べると周期的に性質の似た元素が現れることを発見 65
- Milankovic, M.** ミランコヴィッチ セルビア 1879-1958
 1941年太陽系の地球の動きを解析的に研究し、周期的な地球の気候の変動を理論的数学的に解析した 15

N

- Nagaoka, H.** 長岡半太郎 日本 1865-1950
 1904年太陽系型原子の構造モデル 65
- Newton, Sir I.** ニュートン イギリス 1642-1727
 1687年プリンキピア出版; 万有引力の法則 17; 運動の法則 38, 43, 55;
 作用反作用の法則 56; 運動量保存則 55; 運動エネルギー 81;
 地球の歳差運動の解明 15; 重力質量 79; 慣性質量 79;
 微分積分学 49; 力の単位 N 8, 17; 力Nの組立単位 $\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ 247

O

- Oersted, H.C.** エルステッド デンマーク 1777-1851
 1820年電流の磁気作用の発見 195
- Ohm, G.S.** オーム ドイツ 1789-1854
 1827年オームの法則（電流と電位差が比例）の発見 191

P

- Pascal, B.** パスカル フランス 1623-1662
 圧力の単位 20; 大気の圧力(大気圧) 120, 232; 血圧 235;
 今後推奨される血圧の単位 251 人は考える葦(あし)である
- Perrin, B. J.** ペラン フランス 1870-1942
 1908年物質が全て原子からなることを実験で証明した 64
- Planck, M** プランク ドイツ 1858-1947
 1900年輻射式の発見 211; 量子論の祖 213; ドイツを代表する
 研究所は、全てマックスプランク研究所とその名が冠されている
- Ptolemaeus, C.** プトレマイオス ギリシャ 83頃-168頃
 数学者 物理学者 天文学者 16

R

- Rutherford, E.** ラザフォード ニュージーランド 1871-1937
 1911年 α 線散乱実験結果を基にして原子構造モデルを提唱した 65

S

- Savart, F.** サバール フランス 1791-1841
 ビオ・サバールの法則 電流の周りの磁場の一般的表現 200
- Stefan, J.** シュテファン スロベニア 1835-1893
 1879年シュテファン・ボルツマンの法則の発見 213

T

- Timocares** チモカリス ギリシャ B.C.3世紀
 星の観測データ 16
- Torricelli, E.** トリチェリ イタリア 1608-1647
 1643年真空の実験 空気の重さを測る 232;
 圧力の単位トルTorrは、トリチェリの頭文字

W

- Wien, W.** ウィーン ドイツ 1864-1928
 1893年ウィーンの変位則の発見 213