

小学校理科 A・B（物理学分野）

| | |
|---------------------|----|
| 物理学の扉 | 2 |
| 履修の注意 | 3 |
| 実験課題：1. 物質の密度 | 5 |
| 2. 物質の電気抵抗 | 8 |
| 3. 重力加速度 | 13 |
| 4. 温度と光 | 18 |
| 付録：単位系が分かれば，物理学が分かる | 35 |

物理学の扉

1. 物理学とはどういう学問か

物理学は、物質の構造・状態を観測して、質量・電荷とエネルギーとの相関から、質量と電荷との本質を解明する学問である。自然は多くの階層を持ち、階層ごとに支配法則を持つ。

2. 物理学の研究対象と研究手法

物理学の対象は、宇宙・生命まであらゆる階層に及ぶ。特に、基盤層（素粒子・クオークの階層）を対象とする学問は、物理学のみ。幅広い対象から、17世紀、物理学は「自然哲学」と呼ばれた（Isaac Newton の通称「プリンキピア」の原題は、「自然哲学の数学的原理」）。

物理学の研究で、観測された物理量の相関を、数学的に明らかにすることが多い。物質の原理はより単純な数学的相関で表現されるとの期待と確信とが、物理学にある。

3. 実験課題から多くを学ぶために

実験課題は、簡単な観測で得られた物理量に、計算を行い、法則の確認を行う。ここで、高校数学の知識を必要とする。ただし、ここで言う「知識」とは、数式変形のスキルと問題解法との記憶ではない。これらの記憶しかない（さえない）学生は、実験課題の遂行とレポートの執筆とで、大きな困難に直面するだろう。

4. 学習指導要領は子どもたちの考える力を育てられるのか？

学習指導要領は、長い一文に複数の述語を含むのに主語を欠き、「並びに・及び・とともに」などの接続関係の曖昧な接続詞を多用した意味不明の文章の集合体である（一度、読んでみるとよい。読み進めることが困難なはずだ）。そこで、文部科学省は安価な「解説」を発行している（安いので、こちらも読んでみるとよい）。その小学校学習指導要領「解説」理科編掲載の『エネルギー』を柱とした内容の構成を以下に示す（他に、『粒子』同）もある。

| 校種 | 学年 | エネルギー | | | |
|-----|------|---|--|--|--|
| | | エネルギーの見方 | エネルギーの変換と保存 | エネルギー資源の有効利用 | |
| 小学校 | 第3学年 | 風やゴムの働き ・風の働き ・ゴムの働き | 光の性質 ・光の反射・集光 ・光の当て方と明るさや暖かさ | 磁石の性質 ・磁石に引きつけられる物 ・異極と同極 | 電気の通り道 ・電気を通すつなぎ方 ・電気を通す物 |
| | 第4学年 | | 電気の働き ・乾電池の数とつなぎ方 ・光電池の働き | | |
| | 第5学年 | 振り子の運動 ・振り子の運動☆ | 電流の働き ・鉄心の磁化、極の変化（小6から移行） ・電磁石の強さ（小6から移行） | | |
| | 第6学年 | てこの規則性 ・てこのつり合いと重さ（小5から移行） ・てこのつり合いの規則性（小5から移行） ・てこの利用（身の回りにおけるてこを利用した道具） | 電気の利用 ・発電・蓄電 ・電気の変換（光、音、熱などへの変換） ・電気による発熱 ・電気の利用（身の回りにおける電気を利用した道具） | | |

各学年で「電気」が起こす現象を取り上げるけれど、電気が金属中の自由電子の流れとの本質を教えないので、共通の原因である電子の運動で各現象を説明することはない。ここに掲載していない『粒子』同にある『粒子』のもつエネルギーとの相関にも触れない（原子・分子・イオンと呼ばず、「粒子」と呼ぶことに注意）。このように、学習指導要領理科編は、自然科学の基礎・基本の多くを含まず、さらに、系統性・普遍性を欠く。したがって、同要領にそって講義すれば、考える力のない子どもを育ててしまうことに、教員は注意を払う必要がある。

小学校理科 A・B（物理学分野）履修の注意

◆ 履修の準備

履修に先立ち、以下の2点の準備をすること。また、4回の実験ごとに、この実験指示書を事前に熟読し、実験課題を深く理解して実験に臨むこと。

- 1) 中学校の技術・家庭の教科書を読んで、次の項目の復習をしておくこと。
 - ・副尺付きキャリパ（ノギス）の使用法。
 - ・電気回路図の見方と、実体配線との関係。
 - ・電気測定器（アナログ電流計・電圧計、回路テスタ）の接続法と測定法。
副尺付きキャリパ（ノギス）の使用経験のないもの・電気回路実装や測定の経験のないものは、中学校の技術・家庭の教科書を持参することが望ましい。
- 2) 実験課題の遂行や、設問への解答に用いるデータブックとして、「理科年表」（編纂：国立天文台，発行：丸善株式会社）を購入し、持参すること。

◆ レポートの執筆と提出

<レポート記載事項>

レポートに記載する事項は、次のとおり。なお、この実験指示書を丸写しする必要はない。自ら理解した内容を簡潔に記載することが望ましい。

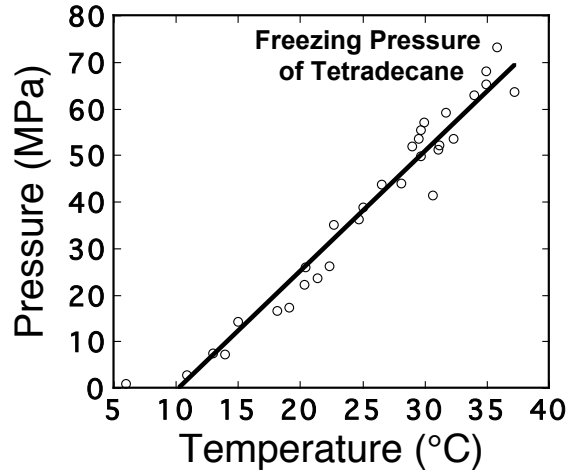
- ・実験時の天候・気温。
- ・目的。
- ・方法（実験指示書の「装置」と「実験課題」とをまとめ、実験手順を簡潔に記載）。
- ・実験結果（有効数字と単位とに十分な注意を払い、結果を記述。グラフを多用し、一目で分かる結果の記述が望ましい）。
- ・議論（実験指示書の「設問」への解答を中心に、実験目的の理解を示すこと）。
- ・参考文献・URL（実験レポート執筆の際、参考にした書籍・URLを記載）。
- ・感想・要望（実験実施が、自己の自然認識の深化に与えた影響などを記述。また、実験課題の改善への要望などがあれば、その要望を記述）。

<レポート執筆上の注意>

レポートに記載する事項のうち、数値計算結果の表示・グラフの作画・議論に不十分な点が多いので、これら3点の執筆上の注意を以下に喚起する。

- 1) **数値計算結果の表示**。有効数字が3・4桁の測定値を乗除して計算結果を表示するとき、計算機の計算結果10桁程度をすべて表示するものがある。計算機は、有効数字以降の表示されない部分を0として計算している。しかし、この表示されない部分は、0ではなく、分からないのである。したがって、乗除に用いた測定値のうち最小の有効数字の桁数以上の計算結果は、無意味である。無意味な数字の記載を厳に慎むこと。なお、測定値の有効数字は、アナログ計器なら、最小目盛の10分の一の数字まで、デジタル計器なら、多くの場合、最小値表示の1桁上の数字までである。このことに注意し、最大の有効数字の桁数になるよう、測定を行うこと。また、計算に用いる定数など（「理科年表」から引用することがある）も、測定値の有効数字の桁数に合わせる必要がある。

- 2) **グラフの作画.** 手描きのグラフを描くとき、グラフ用紙を用いること。その際、A4 グラフ用紙の全部(180 mm X 250 mm)を使う必要はない。必要な領域にグラフを描き、切り取って、レポート用紙に貼付してもよい。グラフに長方形の枠を付け、枠内上部にタイトルを書くこと。また、左側と下側の枠線の外側に、縦軸・横軸の物理量とその単位、目盛の数字とを書くこと。目盛の数字の最小値を0にする必要はない。グラフ描画に必要な領域を選ぶこと。さらに、目盛を枠線の内側に描くこと。目盛間隔が広いとき、目盛の数字を書かない小目盛を枠線の内側に目盛より短い線で描くこと。左側の枠線の目盛と同じ目盛を、右側の枠線にも、下側の枠線の目盛と同じ目盛を、上側の枠線にも描くこと。右側と上側との枠線の目盛に、目盛の数字を書く必要はない(右の見本を参照)。



プリンタでグラフを描くときも、手描きのグラフと同様の体裁にすること。このとき、グラフの枠内に、細い線でグリッドを描き加えないこと。

- 3) **議論.** 設問で、測定値と計算値・文献値との差の原因を訊かれると、単に、測定誤差が原因と答えるものが多い。このとき、測定機器・操作の誤差を合理的に見積もり、この誤差を考慮した計算結果と当初の計算結果との差が一致することを示すこと。

なお、「一致する」とは、計算した数字がすべての桁で一致することではない。最初の1桁の一致なら10%の誤差で一致、2桁の一致なら1%の誤差で一致と言える(よい一致)。

<レポート提出期限>

次週の実験の開始時、配布したレポート表紙に必要事項を記載し、上に示す記載事項をすべて執筆したA4版用紙を使用したレポートを、レポート表紙とともに、左上を綴じて提出すること。最終の実験レポートを、翌週、物理学担当教員に提出する。

D評価のレポートを提出したものに、レポートの再提出を求める。再提出を求められたレポートを、次週の実験の開始時か、翌週、物理学担当教員に提出する。

◆ レポートの評価

実験課題をすべて実施することが、C評価以上の評価の必要条件である。

必ず解答すべき設問にほぼ解答したものにはC評価を、深く学習したいものが解答する設問の一部にも解答したものにB評価を、同設問のほとんどにも解答したものにA評価を、同設問のすべてに解答したものにS評価を与える。実験課題をすべて実施しないか、必ず解答すべき設問に解答しないか、または、その一部にしか解答しないものはD評価となる。

1. 物質の密度

1. 1 目的

金属試料 3 種の密度測定から、金属元素を特定する。さらに、特定された金属の原子 1 個の体積と質量とを算出し、原子の構造に基づく原子内部の質量分布によって、金属元素ごとに原子の質量と体積とが異なることを理解する。

1. 2 原理

密度とは、単位体積当たりの質量である（単位：kg/m³）。したがって、密度は、試料の質量と体積とを測定し、質量を体積で除せば求められる。

特に、常温で固体である物質の密度は、密度の温度依存性（熱膨張）が小さく、質量と体積との測定が簡単なので、容易に求められる。

液体の密度測定には、液体体積標準容器（ピクノメータなど）を必要とし、密度の温度依存性が大きいので、注意を要する。また、気体密度測定は、密度の温度・圧力依存性がともに大きく、また、密度そのものが小さい値なので、測定には高度な技術を要する。

注) 質量の本質は分かっていない。古典力学で、質量は、力と加速度との比例係数でしかない。すなわち、ニュートンの運動方程式 $F = dP/dt = m dv/dt = m d^2r/dt^2$ で、外力 F と加速度 ($dv/dt, d^2r/dt^2$) との比例係数として、質量が現れる（ここで、 P は運動量、 m は質点の質量、 v は速度ベクトル、 r は質点の位置ベクトル）。質量間の相互作用は、万有引力の法則である。しかし、この法則がどうして成立するのも分かっていない。ただ、この関係が、原子内部から遠く宇宙のはてまで、成立している。

1. 3 装置

試料：試料（直方体）、試料（丸棒）、試料（球）。

測定機器：電子天秤（床下測定用台付き）、外測マイクロメータ、副尺付きキャリパ（ノギス）、棒状温度計。

汎用機器：ビーカ（大）、ビーカ（小）。

注) 電子天秤の準備。事前に、電子天秤の電源を投入しており、すぐに質量測定できる。

しかし、新たに電源を投入して、このような電子測定装置を使用するとき、電源投入後 30 分から 1 時間、ヒートランと呼ぶ待ち時間をおかねばならない。電子回路の動作に温度依存性があるので、測定装置の内部温度が定常的温度（通常、室温より高い）に達する必要があるから。電子天秤の分解能（最小測定単位）は 1 mg。しかし、確度（計測器の測定値と「真値」との最大差）は 0.01 g。このことに注意して、質量の有効数字を決めること。

1. 4 実験課題

- 1) ビーカ（大）に 8 分目、水をくみ、棒状温度計を差し込み、誤って落とすとことのないところに、ビーカ（大）を置く。

＜試料（直方体）の密度測定＞

- 2) 試料（直方体）の寸法を、外測マイクロメータで測定し、試料（直方体）の体積を算出する。このとき、試料（直方体）のどの位置の測定値を、あるいは、いくつかの測定値をどのように処理して、試料（直方体）の寸法とするか検討すること。
- 3) 電子天秤上面の計量皿に試料（直方体）を置き、その質量を測定し、前項で算出した試料（直方体）の体積で除して、試料（直方体）の密度を求める。

＜試料（丸棒）の密度測定＞

- 4) 試料（丸棒）の長さを副尺付きキャリパ（ノギス）で、同直径を外測マイクロメータで測定し、試料（丸棒）の体積を算出する。このとき、試料（丸棒）のどの位置の測定値を、あるいは、いくつかの測定値をどのように処理して、試料（丸棒）の直径とするのか検討すること。
- 5) 試料（直方体）と同様、試料（丸棒）の密度を求める。

＜試料（球）の密度測定＞

- 6) 電子天秤の底面中央にある黒いプラスチックカバを取り、床下秤量金具に、ゼムクリップで作った吊り金具をぶら下げる。電子天秤の表示（吊り金具の質量）が安定したら、RE-ZERO ボタンを押して、表示を 0.000 g にし、吊り金具の質量を、風袋として差し引いて測定できるようにする。
- 7) 吊り金具に、試料（球）をぶら下げ、試料（球）の質量を測定する。
- 8) ビーカ（大）の水温を測定し、「理科年表」の水の密度の温度依存性から、測定に使用する水の密度を求める。
- 9) 電子天秤の底面にぶら下げられた試料（球）を、ビーカ（大）の水に沈める。このとき、試料（球）のみが水に沈むよう、ビーカ（大）の水の一部を捨てたり、ビーカ（大）と机の上面の間に本などを差し込んで、ビーカ（大）の水面位置を調節する（この調節は、水面に接する物体に、水の表面張力が働いて、見かけの質量が大きくなるので、表面張力の効果を低減させるため不可欠）。
- 10) 電子天秤の表示が安定したら、水の浮力で軽くなった試料（球）の見かけの質量を測定する。試料（球）の質量と、同見かけの質量との差から、水の浮力を求め、水の密度を用いて、試料（球）の体積を求める。さらに、試料（球）の質量を、その体積で除して、試料（球）の密度を求める。

注) 試料の測定順序。3種の試料を持ち回りで、同時に3人が、それぞれ測定すること。したがって、上の課題の試料の測定の順番は一例であって、測定試料の順番を入れ替えてよい。また、試料（直方体）と試料（丸棒）とに刻印された試料番号を、また、試料（球）の大きさ（大、中、小）をレポートに明記すること。

＜試料（球）の密度測定＞の代替課題

次の簡便な方法で、試料（球）の密度を求めてもよい。ただし、この代替課題を選択した者は、水とビーカ（小）との合計質量の変化から水の浮力を求める方法と、その方法で水の浮力が求められる理由とをレポートに記述すること。

- 6') 試料（球）を電子天秤上面の計量皿に置き、試料（球）の質量を測定する。
- 7') ビーカ（大）の水温を測定し、「理科年表」の水の密度の温度依存性から、測定に使用する水の密度を求める。
- 8') ビーカ（大）の水の一部をビーカ（小）に移し、電子天秤上面の計量皿に置き、水とビーカ（小）との合計質量を計測する。

- 9') 吊り金具でぶら下げた試料(球)のみを、ビーカ(小)の水に沈める。このとき、吊り金具の下端を水に沈めないよう注意すること。
- 10') 電子天秤の表示が安定したら、水とビーカ(小)との合計の変化した質量を測定する。この変化から水の浮力を求め、水の密度から、試料(球)の体積を求める。さらに、試料(球)の質量を、その体積で除して、試料(球)の密度を求める。

1. 5 設問

- 1) 測定された試料(直方体)、試料(丸棒)、試料(球)の密度と、「理科年表」の「単体の密度」とを対照し、3種の試料の金属元素を特定せよ。
特に、試料(球)の元素候補は複数あるけれど、次の2点を考慮し、元素を特定せよ。
第1に、水の表面張力により見かけの質量が大きめに測定されること。第2に、学生実験に使用する試料なので、安定な元素を採用していること。
- 2) 特定された元素の原子量とアボガドロ数(いずれも、「理科年表」に掲載)とから、3種の元素の原子1個当たりの質量を求めよ。
- 3) 測定した各元素の密度と、各元素の原子1個当たりの質量とから、3種の元素の原子1個当たりの体積を求めよ。
- 4) 3種の元素の原子1個当たりの質量を互いに比較し、同様に、3種の元素の原子1個当たりの体積も互いに比較せよ。これらの比較から、原子1個当たり質量と同体積との元素依存性に差があるか検討せよ。このとき、原子の構造、特に、原子核と電子雲との大きさに留意して検討せよ。
- 5) 非SI併用単位 L(リットル)、a(アール)、ha(ヘクタール)をSI(SI接頭語と、SI基本単位またはSI組立単位)で表記せよ(なお、リットルを「ℓ」と書くのは、文部科学省が「検定」する教科書でのみ見られる風変わりな表記。また、アールとヘクタールとの使用は推奨されていない)。

<この課題をさらに深く学習したいものは、以下の設問にも解答すること>

- 6) 各元素の原子番号と、最も存在度の大きな同位体の質量数(いずれも、「理科年表」に掲載)とから、各元素の核子構成を求めよ。こうして求めた各元素の中性原子1個あたりの電子・陽子・中性子の個数に、これらの素粒子の質量(「理科年表」に掲載)を乗じて、各元素の原子1個に含まれる素粒子の全質量を求めよ。
- 7) 元素の原子量とアボガドロ数とから求めた原子1個当たりの質量と、元素の原子1個の素粒子の全質量とは一致するか。一致しないなら、どうして一致しないのか議論せよ(これらの数値を求めるのに、この実験での測定値を用いていないので、もし一致しないのなら、一致しない理由は、測定誤差ではなく、科学的理由である)。

2. 物質の電気抵抗

2. 1 目的

マンガン線・白熱電球・炭素電球を負荷とし、これらに印加した電圧の測定と負荷に流れる電流の測定とから、これらの試料の電気抵抗を求める。さらに、これらの電気抵抗の電流依存性（実体は、温度依存性）から、金属と半導体の電気伝導の機構を理解する。

2. 2 原理

2. 2. 1 電気抵抗と体積抵抗率

導体の2個の端子間に電位差 V を与えると、導体に電流 I が流れる。

このとき、 $R = VI$ を、「電気抵抗」（または、単に、「抵抗」と定義する。電流 I が印加電圧 V に比例（その比例係数： $1/R$ ）することを、「オームの法則」と呼ぶ。

一様な物質でできた導線の電気抵抗 R は、導線の長さ L に比例し、導線の断面積 S に反比例する。比例係数 ρ を用いると、電気抵抗 R は、 $R = \rho L/S$ で与えられる。この比例係数 ρ を、「体積抵抗率」（または、「比抵抗」、単位： Ωm ）と呼ぶ。体積抵抗率は物質定数で、その値は大きく変化し、最も小さな銀の $10^{-8} \Omega\text{m}$ から、最も大きな雲母の $10^{15} \Omega\text{m}$ に及ぶ。また、体積抵抗率は、わずかに圧力依存性を持ち、次項に述べるように、かなり変化に富む温度依存性も持つ。

注) オームの法則。1827年、Georg Simon Ohm（ドイツの物理学者、1787-1854）が、「オームの法則」を発見した。この発見の背景に、1799年ころ、Alessandro Volta（イタリアの物理学者、1745-1827）が発明した電池により、定常電流（ただし、短時間）を用いる実験が、19世紀に一般化したことがある。

2. 2. 2 固体の電気伝導機構

固体の体積抵抗率の温度依存性は、金属と半導体・絶縁体（誘電体）とで大きく異なる。金属の体積抵抗率は、温度の上昇に伴い増加する。一方、半導体・絶縁体（誘電体）のそれらは、指数関数的に減少する。この違いは、次に述べる固体の電気伝導機構の違いに起因する。

固体の電気伝導機構の説明に先立ち、原子核に束縛された電子のエネルギー準位の説明をする。

原子核に束縛された電子は、その束縛により離散的なエネルギー準位に分布する。電子は一つのエネルギー準位を1個で占有する粒子（フェルミ粒子）なので、絶対零度に近い低温に置かれた電子は、原子核に近い最も低レベルの準位から、順に、空席を置くことなく、上の準位を占有する。低いエネルギー準位を占有する電子を内殻電子、高いエネルギー準位（金属元素で、温度に換算すると、 $5 \times 10^4 \text{ K}$ に相当するくらい大きい）を占有する電子を外殻電子と呼ぶ。

金属の外殻電子は、隣接する原子間で共通の準位を持ち、金属中を自由に運動できる自由電子となる。一方、半導体・絶縁体（誘電体）の外殻電子は、原子核に束縛され、自由電子とならない。強い束縛を逃れ自由電子となるには、半導体・絶縁体（誘電体）を高温にして、電子が大きな運動エネルギーを持つ必要がある。そこで、縦軸に電子のエネルギー準位をとって、低温での電子の束縛を図示したのが次頁図（「バンド構造」と呼ぶ）である。

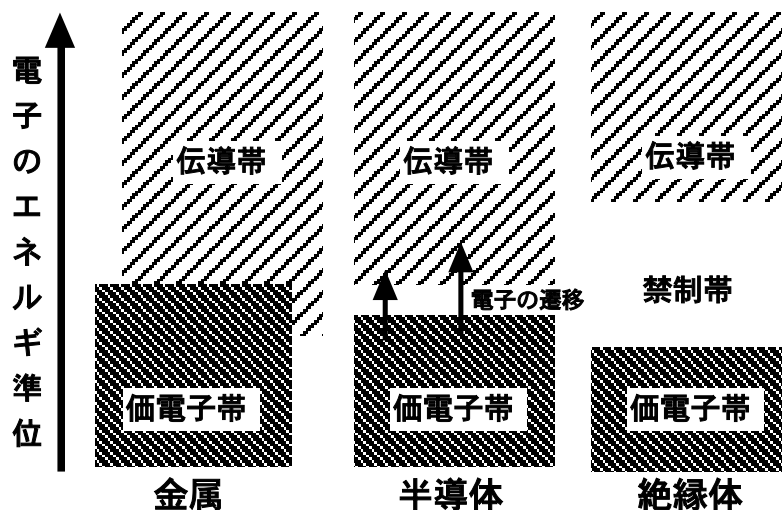
金属のバンド構造は、価電子帯と伝導帯とに重なりがある。重なった部分の準位を占有する

のが自由電子となる金属の外殻電子である。金属を高温にして、電子の一部が大きな運動エネルギーを得て、より高いエネルギー準位に遷移しても、自由電子の数はほとんど増えない。むしろ、高温に伴う格子振動（原子核と内殻電子との振動）により、自由電子の運動が阻害されるので、金属の体積抵抗率は、温度上昇とともに増加する。

半導体のバンド構造は、価電子帯と伝導帯とに重なりがなく、隙間がある。この隙間を禁制帯と呼ぶ。禁制帯には、電子のエネルギー準位がない（ドナやアクセプタと呼ばれる不純物を半導体に添加（dope）すると、禁制帯中に不純物準位ができる）。ただし、この禁制帯の幅は狭く、室温程度の温度で、半導体の外殻電子は、励起され伝導帯に遷移できて、自由電子となる。一方、外殻電子が飛び出した価電子帯上部の空席

のエネルギー準位は、正孔（ホール）と呼ばれ、正の電荷を持つ粒子のように振る舞う。半導体の自由電子と正孔とは、温度上昇に伴い指数関数的に増加する。そのため、半導体の体積抵抗率は、温度上昇に伴い指数関数的に減少する。

絶縁体（誘電体）のバンド構造も、価電子帯と伝導帯とに重なりがなく、禁制帯がある。ただし、禁制帯の幅が広く、室温どころか、かなりの高温でも、絶縁体（誘電体）の外殻電子は伝導帯に遷移できない。絶縁体（誘電体）と半導体とのバンド構造に質的な差はなく、禁制帯の幅の量的な差だけである。絶縁体（誘電体）も融解するほどの高温にすれば、半導体同様、体積抵抗率が指数関数的に減少する。



固体の超簡略バンド構造

注) 電気伝導と磁性とに相関はない。小学校理科（第3学年）は、固体の電気伝導（電気を通すかどうか）と固体の磁性（磁石にくっつくかどうか）とを扱う。ところが、電気伝導と磁性との間に相関があるとの誤解が、一部の小学校教員にある。

この誤解の原因は、次の「小学校学習指導要領」理科第3学年の物質・エネルギー分野の「目標」の「記述」にある。「物の重さ、風やゴムの力並びに光、磁石及び電気を働かせたときの現象を比較しながら調べ、見いだした問題を興味・関心をもって追究したりものづくりをしたりする活動を通して、それらの性質や働きについての見方や考え方を養う。」ただし、「記述」といっても、複数の述語があるので、子ども・教員などの複数の主語が必要なのに、主語を欠き、「並びに」・「及び」などの並列関係の曖昧な接続語が多用された意味不明の文章である。この目標に「磁石及び電気を働かせたときの現象を比較しながら調べ」とあるのが誤解の原因だ（もともと意味不明なので、誤解するのも無理はない。また、学習指導要領は、自然科学の基礎・基本の多くを含まず、系統性・普遍性を欠くので、同要領の「内容」を教えれば、考える力、「生きる力」を涵養できると期待するのは誤りである）。

ところで、「磁性」とは、外部磁場を印加したとき、物質に生じる磁気モーメント（磁化）の応答である。外部磁場の100万分の一程度の順方向の磁化しか生じない物質を常磁性体

(Al など), 外部磁場の 100 万分の一程度の逆方向の磁化を生ずる物質を反磁性体 (Cu など), 外部磁場の 100 万倍程度の順方向の大きな磁化を生ずる物質を強磁性体と呼ぶ (他に, 少数の反強磁性体, フェリ磁性体などがある).

強磁性を示す元素は, 遷移元素と呼ばれる Fe, Ni, Co と, ランタン系列の 6 元素, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm の計 11 元素である. これらの元素には, 強磁性の元となる特殊なエネルギー準位の電子 (3d, 4f) があり, それらの電子が, これらの元素の原子を微小な磁石のように振る舞わせる (「自発磁化」と呼ぶ. 外部磁場を印加しなくても, 強磁性の原子が持つ磁気モーメント). この微小な磁石の方向が外部磁場によって揃い, 外部磁場よりはるかに大きな磁化を示す (その結果, 磁石にくっつく).

このように, 磁性は, 原子の内在的性質であって, 固体という集合体の性質とは無関係である. 強磁性の金属元素は, 単体の金属 (電気を通す) であっても, 酸素と化合し化合物 (一般に絶縁体で, 電気を通さない. 代表的なのは, Fe の酸化物であるフェライト) であっても, 強磁性を示す (磁石にくっつく).

2. 3 装置

試料: マンガン線 (台・端子付き), 白熱電球 (タングステンフィラメント内蔵, 100 W 型, ソケット・端子台付き), 炭素電球 (炭素フィラメント内蔵).
測定機器: 交流電圧計, 交流電流計, 回路テスタ, 外測マイクロメータ, 金属製巻尺.
汎用機器: 単巻変圧器 (スライダック), AC コード, 配線コード (端子付き).

2. 4 実験課題

<マンガン線の抵抗測定>

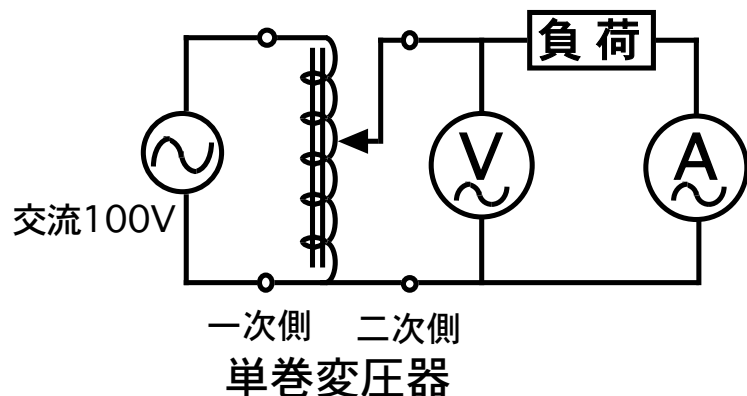
- 1) 負荷をマンガン線とし, 右図の単巻変圧器二次 (出力) 側回路を配線する. このとき, 電流端子に, 最大の 5 A 端子を, 電圧計の端子に, 75 V 端子を選ぶ.

担当教員から配線の点検を受けた後, 単巻変圧器一次 (入力) 側に接続する AC コードを受け取り, 接続する. 以上の測定前の準備の最後に, 単巻変圧器の出力電圧を最小にするため, 単巻変圧器の摺動子を反時計まわりに限界まで回しておく.

- 2) 配線に誤りのないことを, 再度, 確認して, AC コードのプラグをコンセントに差し込む. 単巻変圧器の摺動子を時計まわりにゆっくり回して, 負荷に電圧を印加する. 負荷への印加電圧を 2 V きざみで, 24 V まで変化させる. 各印加電圧で, 負荷に流れる電流を電流計で測定する. このとき, 電圧計・電流計の測定値を, 最小目盛 10 分の一の桁まで読みとる (このとき, 電流計・電圧計のメータ面を水平にすること).
- 3) 電圧・電流の測定値から, マンガン線の抵抗を算出する.

<白熱電球の抵抗測定>

- 4) 単巻変圧器の摺動子を反時計まわりに限界まで回し, 単巻変圧器の出力電圧を最小にして, さらに, AC コードのプラグをコンセントから抜く. 安全な測定のため, 以上の



操作をした後、負荷を白熱電球に取り替える。このとき、電流計の端子に、最大の 5 A 端子を、電圧計の端子に、150 V 端子を選んで配線する。

- 5) 単巻変圧器の摺動子を時計まわりにゆっくり回して、負荷に電圧を印加する。負荷への印加電圧を 10 V きざみで、100 V まで変化させる。各印加電圧で、負荷に流れる電流を電流計で測定する。
- 6) 電圧・電流の測定値から、白熱電球の抵抗を算出する。

<炭素電球の抵抗測定>

- 7) 4) の前段と同じ操作をした後、負荷を炭素電球に替え、4) の後段の操作をする。
- 8) 5) と同様、各印加電圧で、負荷に流れる電流を電流計で測定する。
- 9) 電圧・電流の測定値から、炭素電球の抵抗を算出する。

<追加測定、測定値の整理>

- 10) 回路テスタで、マンガニン線・白熱電球・炭素電球の抵抗を測定する。
- 11) マンガニン線・白熱電球・炭素電球の印加電圧と電流との相関を、縦軸を電圧に、横軸を電流にした 1 枚のグラフに描く。
- 12) マンガニン線・白熱電球・炭素電球に流れる電流と抵抗の相関を、縦軸を抵抗に、横軸を電流とした 1 枚のグラフに描く。このとき、電流 0 A のときの抵抗値として、回路テスタで測定した抵抗値を記入する。
- 13) マンガニン線の直径を、外測マイクロメータで測定する。マンガニンの体積抵抗率 ($41.5 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$) と、印加電圧 10 V のときの抵抗値とから、マンガニン線の長さを算出する。一方、金属製巻き尺で、マンガニン線の長さを有効数字 2 桁で粗く測定する。
- 14) タングステンの体積抵抗率の温度依存性（「理科年表」に掲載）を、横軸を温度に、縦軸を体積抵抗率にしたグラフに描く。ただし、温度の下限を 0°C とし、上限を 3000°C とし、体積抵抗率の上限を $100 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ とすること。
- 15) 白熱電球のタングステンフィラメントは、直径 $70.0 \mu\text{m}$ 、長さ 586 mm である。これらの値を用いて、白熱電球に流れる各電流値のときのタングステンフィラメントの抵抗値から、各電流値のときのタングステンの体積抵抗率をすべて求める。
- 16) 求められたタングステンの各電流値のときの体積抵抗率を、前項で描いたタングステンの体積抵抗率の温度依存性のグラフにあてはめ、各電流値のときのタングステンフィラメントの温度を求める。このとき、 1200°C 以上の高温に対応する体積抵抗率のデータがないので、体積抵抗率の温度依存性の直線を高温側に伸ばし、大きな体積抵抗率のときの温度を、グラフの直線に外挿して求めること。こうして求められたタングステンフィラメントの温度の電流依存性を、横軸を電流に、縦軸を温度にしたグラフに描く。

注) 白熱電球のフィラメント、白熱電球の 6 大発明。実験に用いる 100 W 型白熱電球のタングステンフィラメントは、二重コイルになっている。直径 $70.0 \mu\text{m}$ のタングステン線を外径 0.27 mm の単コイルに巻き、さらに、この単コイルを外径 1.02 mm 、長さ 18.5 mm の二重コイルに巻く。二重なので、 586 mm もの長い線を電球中央に取り付けられる。

1921 年、東京電気（1939 年、芝浦製作所と合併して東芝。1989 年、東芝ライテックに分離独立。2010 年、白熱電球の製造を終了）の三浦順一が、この二重コイルを発明した。二重コイル電球は、封入ガスの対流によるタングステンフィラメントの温度低下を防止し、その結果、高輝度を実現したので、電球の 6 大発明の一つに数えられている。

他の5大発明は次のとおり。1879年、エジソンによる実用炭素電球の発明。1910年、クーリッジ(General Electric)による引線タングステン電球の発明(電球の高輝度・長寿命化)。1913年、ラングミュア(GE)によるガス封入電球の発明(ガス封入でタングステン蒸発を抑制して、バルブ内面の黒化防止。封入ガスは、アルゴン Ar 86-98%，窒素 N₂ 14-2%の混合気体。近年、Arに代わり、黒化防止効果の大きいクリプトン Kr が使われることもある)。1925年、不破橋三(東京電気)による内面艶消し電球の発明(電球の眩しさを解消)。1959年、スプラによるハロゲン電球の発明(小型石英バルブにハロゲンを封入し、電球の超高輝度・超長寿命を実現)。6大発明のうち、二つが日本人の発明、他の四つがアメリカ人の発明。

2. 5 設問

- 1) マンガニンの体積抵抗率とマンガン線線の直径とから算出したマンガン線線の長さは、実測値と一致したか。一致しないのなら、その原因は何か。
- 2) タングステンの体積抵抗率の温度依存性と、タングステンの体積抵抗率の電流依存性の実測値とから求めたタングステンフィラメントの温度は、白熱電球の輝きの実感と一致したか。一致しないのなら、その原因は何か。
- 3) 炭素電球の印加電圧と電流との相関と、炭素電球に流れる電流と抵抗の相関とから、炭素電球のフィラメントの電気伝導機構を答えよ。
- 4) SI組立単位 W は、SI組立単位 V と SI基本単位 A との積であることを示せ。
- 5) 「理科年表」掲載の「金属および合金の熱伝導率」と「金属の電気抵抗」とのデータから、二つの表に共通に記載されている18の金属元素(Zn, Al, Cd, K, Au, Ag, Hg, Sn, W, Fe, Cu, Na, Pb, Ni, Pt, Pd, Mg, Mo)の0°Cの熱伝導率と電気伝導率(体積抵抗率の逆数、単位: S/m)とをそれぞれ縦軸・横軸としたグラフを描け。これら金属元素の熱伝導率と電気伝導率との間にどのような相関があるか。また、熱伝導率と電気伝導率との単位のSI基本単位構成を示せ。

<この課題をさらに深く学習したいものは、以下の設問にも解答すること>

- 6) 前項で求めた金属元素の熱伝導率と電気伝導率との間の相関は、なぜ生じるか。
- 7) 鏡は光をよく反射する。鏡で、光を反射しているのは、ガラス表面に付けた銀の薄膜(薄いと言っても、光を透過するほど薄くはない)である。銀が使われるのは、可視光から赤外までの広い波長帯域の光で、銀の反射率が大きいから(「理科年表」掲載の「金属面の分光反射率」参照)。金や銅は、紫から緑までの短い波長の可視光の反射率が小さいため、反射光に黄金色・赤銅色と呼ばれる特有の金属光沢を持つので、鏡には使えない。銀の光の反射率が大きいのはなぜか。ところで、光が金属表面で反射されるとは、どのような現象か(ヒント: 金属表面での光の反射を「プラズマ反射」と呼ぶ)。
- 8) マンガニンの合金組成はどうなっているか。また、マンガニンの用途は何か。マンガニンの体積抵抗率の特殊な温度依存性が生じる原因は何か。
- 9) 白熱電球の高輝度実現には、フィラメントを高温に保つことが不可欠である。タングステンは単体で最高の融点(3407°C)を持つ元素であるけれど、融点近くまで加熱すると、蒸発が激しくなり、フィラメントがすぐ断線してしまう。ハロゲンを白熱電球のバルブに封入すると、電球が長寿命になるのはなぜか。また、ハロゲン電球のバルブを小型にし、透明石英で作るのはなぜか。
- 10) 炭素の固体には、ダイヤモンド(高压相)と黒鉛(低压相。グラファイトとも呼ぶ)とがある。炭素電球のフィラメントは、いずれの固相か。ダイヤモンド、または、黒鉛の固体(結晶)の結合状態で、炭素原子のどの外殻電子が電気伝導を担っているのか。

3. 重力加速度

3. 1 目的

単振り子の振動周期を測定して、地球の重力加速度を測定する。万有引力の法則と、測定された重力加速度が、地球表面の凹凸や自転により一定でないことを理解する。

3. 2 原理

3. 2. 1 万有引力の法則

二つの質点（質量は、それぞれ、 M_1 , M_2 ）の間に作用する力は、それぞれの質量に比例し、質点間の距離 r の自乗に反比例し、その方向は、二つの質点を結ぶ線分上で、互いに相手の質点に向く。この質点間の引力を万有引力と呼び、この力の大きさと方向を与える法則を「万有引力の法則」と呼ぶ。万有引力の大きさは、比例定数（万有引力定数）を G として、次式で表

される。
$$F = -G \frac{M_1 M_2}{r^2}$$
。右辺の負号は、二質点間に働く力が引力であることを示す。

このように、質量は、他の質量に力を及ぼす。この力で、他の質量が運動すれば、質量は、他の質量に仕事をしたことになる。つまり、質量は、他の質量にエネルギーを与えることができる。言い換えれば、質量は、そのまわりの空間を、エネルギーを与える可能性のある空間に変える。しかし、この表現は、質量の存在以前に空間の存在を前提としており、正しくない。厳密には、質量は、その属性（内在的・本質的性質）として、エネルギーを与える可能性のある空間を持っていると言うべきである（「時間」も質量の属性である）。

3. 2. 2 地球の重力と重力加速度

地球が、地表にある物体に及ぼす力を重力と呼ぶ。重力のほとんどは、地球が地表の物体に及ぼす万有引力である（重力の他の部分は、地球の自転に伴う力で極めて小さい）。したがって、地表にある質量 m の物体に働く重力は、次式で与えられるとしてよい。重力（地球が地表の物体に及ぼす万有引力）は物体の質量に比例するから、質量 m に対する比例定数に相当する部分を、 g とおくことができる。 g を重力加速度と呼ぶ。すなわち、

$$F = -m \frac{M_e G}{R_e^2} = -m g$$
。ここで、 M_e は地球の質量、 R_e は地球の半径である。

上式を前項の式と比較すると、上式は、巨大な球である地球の質量がその中心にすべて集中したときの地球と地表の物体間の万有引力となっている。

球対称の物体が、他の質点（地表の物体は、地球に比べて極めて小さいから、質点として扱ってよい）に及ぼす万有引力は、ちょうど、球状物体の全質量がその中心に集まっているかのように働くことを容易に証明できる。したがって、上式は正しい表現である。

上式で与えられる重力は、厳密には、地表にある物体のみに適用できる。物体が地表から離れるにつれ、重力は減少する（物体の高度を h とすると、上式で、 R_e の代わりに、 R_e+h を代入する）。とはいえ、旅客機の高度は高々 10 km（一般市民が、経験できる最高高度）なので、我々は、日常、上式を重力を与える式として用いて問題ない。

3. 2. 3 地球の重力下の運動

地表近くの質量 m の物体に重力しか働いていないとき、鉛直上方に z 座標を取ると、ニュートンの運動方程式は、 $F = m d^2z/dt^2 = m dv/dt = -mg$ となる。重力の方向は鉛直下方なので、 mg に負号が付く。ここで、 v は物体の速さで、 $v = dz/dt$ である。

この物体は、重力の方向、すなわち、鉛直下方に運動する。このように、物体に働く力が重力のみのときの物体の運動を、「自由落下」と呼ぶ（大気中を物体が運動すれば、運動とは逆方向で、速さに比例する空気の抵抗が生じる。したがって、真空容器中の運動でなければ、濃い大気のある地上で、厳密には、自由落下はあり得ない）。

上記の運動方程式のうち、 $m dv/dt = -mg$ の両辺を m で割ると、 $dv/dt = -g$ となる。変形して、 $dv = -g dt$ とし、両辺を積分すると、

$$\int dv = - \int_{t_0}^t g dt$$

となり、積分を実行して、 $v = -gt + C_1$ が得られる。ここで、 C_1 は積分

定数で、この運動の初期条件（時刻 t_0 のとき、速さが v_0 ）から、 $C_1 = v_0$ となる。

得られた速さの時間依存性 $v = -gt + v_0$ に、 $v = dz/dt$ を代入すると、 $dz/dt = -gt + v_0$ となり、変形して、 $dz = (-gt + v_0) dt$ とし、両辺積分すると、

$$\int dz = \int_{t_0}^t (-gt + v_0) dt$$

となり、積分を実行して、 $z = -\frac{1}{2}gt^2 + v_0t + C_2$ を得る。

ここで、 C_2 は積分定数で、この運動の初期条件（時刻 t_0 のとき、物体の位置が z_0 ）から、 $C_2 = z_0$ となる。これで、物体の位置の時刻依存性が求められた。すなわち、

$$z = -\frac{1}{2}gt^2 + v_0t + z_0 \text{ である。}$$

このように、ニュートンの運動方程式は 2 階の常微分方程式なので、積分を 2 回実行して、物体の運動の時刻依存性を求めることができる。

これらの依存性から、物体の運動の未来をすべて予測できる。たとえば、物体を鉛直上方に投げ上げれば（ v_0 が正）、 v_0/g 秒後に、物体の速さは 0 になり、その後、落下に転ずることが分かる。地表から投げ上げれば（ z_0 が 0）、物体が達する最高点の高さは、物体の位置の時刻依存性に最高点に達する時刻を代入して、 $v_0^2/2g$ と分かる。

3. 2. 4 単振り子

質点を軽い吊り線（その質量を無視できる）で吊し、質点が、鉛直面内で、周期的往復運動（これを「振動」と呼ぶ）する装置を、単振り子と呼ぶ。

単振り子のふれの角が θ のときを考える（ふれの角 θ は、時刻 t の関数）。質点（質量 m ）には、鉛直下方に、時刻 t によらず、常に、重力 mg が働く。質点には、さらに、吊り線（長さ L ）の張力 T が、吊り線の固定点に向かって働く。張力 T は、質点に働く重力 mg の吊り線方向の分力 $mg \cos\theta$ の反作用である（ T は、 θ の関数だから、 t の陰関数でもある）。したがって、その大きさはこの分力と同じで、その方向はこの分力の反対方向である。結局、これら

の力は打ち消し合い、質点にはたらく力は、吊り線に垂直方向の重力の分力 $-mg \sin \theta$ のみになる（負号は、ふれの角 θ （反時計まわりを正とする）と、常に、逆向きであることを示す）。

そこで、質点の運動方程式は、

質点の速さを v とすると、

$$m \frac{dv}{dt} = -mg \sin \theta \quad \text{となる.}$$

質点の速さを v は、ふれの角 θ を用いて、 $v = L d\theta/dt$ と表せるから、左辺は、 $mL d^2\theta/dt^2$ となる。運動方程式の両辺を m で割ると、

$$L \frac{d^2\theta}{dt^2} = -g \sin \theta \quad \text{となる.}$$

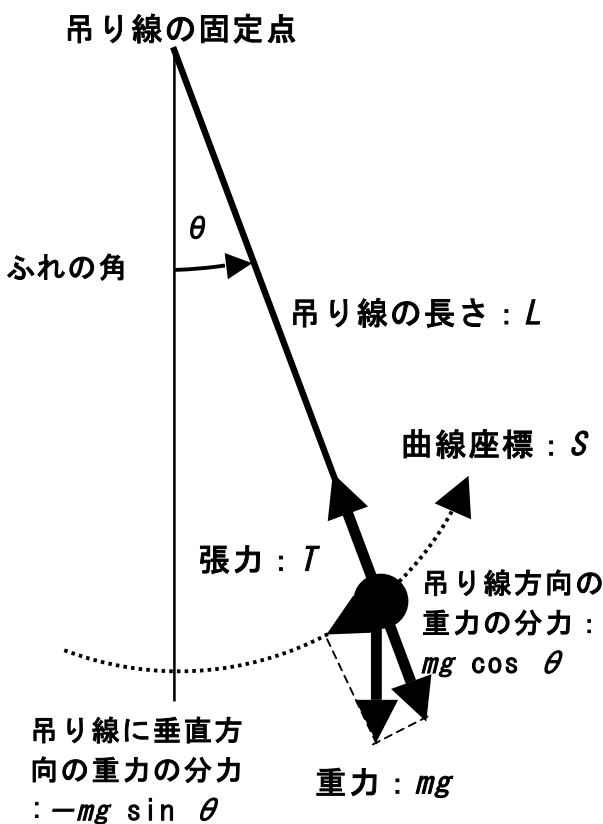
さらに、両辺を L で割ると、

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = -\frac{g}{L} \sin \theta \quad \text{となる.}$$

ここで、運動方程式は、ふれの角 θ の2階の常微分方程式になった。さらに、ふれの角 θ が十分小さいとき、

$\sin \theta \approx \theta$ と近似できて、方程式

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = -\frac{g}{L} \theta \quad \text{は、}$$



この運動方程式の解は自明（ふれの角 θ を2回微分すると、係数が付くものの、ふれの角 θ 自身が出てくるのだから、 \sin, \cos という周期関数が自明解）で、 $\omega^2 = g/L$ とおくと、自明解は、 $\theta = a \cos(\omega t + \alpha)$ となる。ここで、 a は、積分定数で、単振り子の振動の振幅である。また、 α も積分定数で、初期位相と呼び、通常 0 にする。 ω を角速度と呼び、振動周期 τ と次の関係がある。

$$\tau = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

単振り子の周期を測定すれば、単振り子の長さは分かっているから、重力加速度 g を容易に求めることができる。すなわち、 $g = 4\pi^2 L / \tau^2$ で求められる。

単振り子で測定できる重力加速度は、3.2.2で得られた重力加速度と異なる。なぜなら、3.2.2で得られた重力加速度は、地球の形を真球と仮定し、地球の密度分布に、動径依存性はあるものの、角度依存性がないと仮定した、地球表面での値だからだ。

地球の形は、真球ではないし、地球の密度分布は、いずれの方向でも一様ではない。特に、地球の表面にはわずかな凹凸があり、測定地点の標高（平均海面からの高さ）が大きければ、地球の中心からの距離がわずかに大きくなり、重力加速度は小さくなる。

また、地球の自転による遠心力が、自転軸に垂直に地球から外向きに働くから、低緯度ほど、測定される見かけの重力加速度は小さくなる。地球の自転による遠心力の補正項の大きさは、 $\omega^2 R_e \cos \theta$ で与えられる。ここで、 ω は地球の自転の角速度、 θ は測定地点の緯度である。

3. 3 装置

単振り子：単振り子用スタンド（クランプ付き）、ナイフエッジ、吊り環、吊り線（長さ 0.25 m, 0.6 m, 1.0 m の 3 種）、金属球。

測定機器：反射神経測定器、ストップウォッチ、副尺付きキャリパ（ノギス）、金属製巻尺。

3. 4 実験課題

<準備のための測定>

- 1) 二人一組で、反射神経測定器を用いて、動作反応の遅延時間を測定する。各人、10 回測定し、時間とそのばらつきとから、単振り子の周期測定の誤差を見積もる。
- 2) 金属球の直径を、副尺付きキャリパで測定する。いくつかの測定値をどのように処理して、金属球の半径とするか検討する。

<単振り子の周期測定（その 1）>

- 3) 長さ 0.25 m の吊り線の留め具の付いてない端を、吊り環の穴に通し、さらに、金属球の固定金具に差し込み、固定金具のネジを締め、金属球に固定する。単振り子用スタンドを机の端に固定し、ナイフエッジに吊り環を引っ掛け、金属球をぶら下げる。ナイフエッジの単振り子用スタンドへの固定位置を調節し、スタンド下部の横棒がほぼ金属球上端と一致するようにする。
- 4) 金属球の上端に、金属製巻尺の端を当て、巻尺を引き出し、ナイフエッジ上端までの長さを測定する。この長さに金属球の半径を加えて、単振り子の長さとする。
- 5) 単振り子のふれの角が 10° になるよう、金属球を水平に移動させる距離を算出する。金属球上端とナイフエッジとの距離と、三角関数の 10° での値（「理科年表」に掲載）とから、この水平移動距離を求める。スタンド下部の横棒に、金属製巻尺の端を引っ掛け、巻尺を水平に引き出し、横棒と吊り線との間隔を補正して、金属球の移動位置を決める。
- 6) 移動位置に動かした金属球を静かに離し、単振り子を振動させる。
- 7) 測定者は、単振り子の直前に座り、金属球上端が、スタンド下部の横棒の直前を右から左に、あるいは、左から右に通過する回数、10, 20, 100 回に要する時間をストップウォッチで測定する。

<単振り子の周期測定（その 2）>

- 8) 吊り線を長さ 0.6 m の線に交換し、上記の 3) から 7) を実行する。

<単振り子の周期測定（その 3）>

- 9) 吊り線を長さ 1.0 m の線に交換し、上記の 3) から 7) を実行する。ただし、吊り線が長く、スタンド下部の横棒と金属球上端とが一致しないので、操作を次のとおり変更する。

5) を変更。単振り子のふれの角が 10° になるよう、金属球を水平に移動させる距離を算出する。スタンド下部の横棒に金属製巻尺の端を引っ掛け、巻尺を鉛直上方に引き出し、ナイフエッジ上端までの距離を測定する。この距離と、三角関数の 10° での値とから、水平移動距離を求める。スタンド下部の横棒に、金属製巻尺の端を引っ掛け、巻尺を水平に引き出し、横棒と吊り線との間隔を補正して、吊り線の移動位置を決める。

7) を変更。測定者は、単振り子の直前に座り、吊り線が、スタンド下部の横棒の直前を右から左に、あるいは、左から右に通過する回数、10・20・100 回に要する時間をストップウォッチで測定する。

<測定値の整理>

- 10) 3種の吊り線を用いた単振り子の周期を算出する。このとき、動作反応の遅延時間を考慮し、測定された単振り子の10・20・100周期の時間から、有効数字に注意して単振り子の周期を算出し、最も信頼できる周期を、理由を明記して選ぶ。算出・選択され3個の単振り子の周期と対応する単振り子の長さ3種とから、重力加速度を3個求める。
- 11) 横軸を単振り子の長さに、縦軸を単振り子の周期の自乗にしたグラフを描く。

3. 5 設問

- 1) 反射神経測定器の動作反応の遅延時間目盛の間隔を、どうやって決めているか。
- 2) 地球の質量・半径、万有引力定数（いずれも「理科年表」に掲載）から、3. 2. 2を参考に、地球の状態を理想的に仮定した重力加速度を求めよ。この理想的重力加速度は、測定した重力加速度3個と一致したか。一致しないのなら、その原因は何か。
- 3) 横軸を単振り子の長さに、縦軸を単振り子の周期の自乗にしたグラフは、直線になったか。直線であれば、その傾きは何か（傾きの数値を訊いていない）。直線でなければ、どういう曲線か。
- 4) 測定した重力加速度3個は、「理科年表」の「日本各地の重力実測値」に掲載されている盛岡の実測値と一致したか。一致しないのなら、その原因は何か。
- 5) 盛岡の緯度から、地球の自転による遠心力の補正項の大きさを求めよ。測定した重力加速度の測定誤差を見積もると、どの程度か。見積もられた測定誤差と補正項とは、どちらが大きいのか。
- 6) 「理科年表」の「日本各地の重力実測値」に掲載されている重力加速度の実測値から、3. 2. 4にある重力加速度の緯度依存性・高度依存性が見いだせるか。同緯度で標高が大きく異なる地点の組を選ぶと、その重力加速度の差は、高度依存性による差と一致するか（ここで、「標高が大きく異なる」とは、500 m以上の標高差があることを言う）。また、標高が同じで緯度が大きく異なる地点の組を選ぶと、その重力加速度の差は、遠心力の補正項の緯度依存性による差と一致するか。

<この課題をさらに深く学習したいものは、以下の設問にも解答すること>

- 7) 3. 2. 4で、微分方程式を解くときの近似 $\sin \theta \approx \theta$ を行わないとき、その解から得られる周期には、ふれの角依存性が現れる。ふれの角が大きいとき、周期は、わずかに長くなる。ふれの角 10° のときの周期は、ふれの角が無限小のときの周期より、0.19%長い（ふれの角 30° のとき、1.71%長い）。
実験に用いた単振り子とその周期の測定方法（手動計測）で、ふれの角 10° のときの周期とふれの角 30° のそれとの差を検出できるか。
- 8) 単振り子の周期は、単振り子の長さのみに依存し、振り子の質量に依存しない。なぜ、単振り子の周期は、振り子の質量に依存しないのか。
- 9) 日本では、中学校まで、質量 1 kg の物体に働く重力を 1 kgf と定義し、力の単位に kgf を用いている。この力の非 SI 単位の使用は、科学的見地から妥当か。

4. 温度と光

4. 1 目的

温度の本質を理解し、いくつかの温度測定法で体温を測定し、測定原理の違いを理解する。また、電磁波の本質を理解し、可視光の放出を測定し、光の放出原理を理解する。

4. 2 原理その1, 温度

4. 2. 1 温度とは何か,

なぜ高温の物体から低温の物体に「熱」が移動するのか

体積 V の容器に、 N 個の気体分子を入れる。これらの気体分子が容器の中で持つ運動エネルギーと分子間相互作用の総和を内部エネルギー U と呼ぶ。 U , V , N という三つの物理量 (系のサイズに依存して変化するので、示量変数と呼ばれる) で特定される条件の下、この気体の系が取り得る状態の数 $g(U, V, N)$ を、量子統計力学は、数えられるとする (N は一般に 10 の 20 数乗という大きな数なので、すべての気体分子が固定されていてその位置を変えないとし、さらに、一個の気体分子が取りうるエネルギー準位が 2 個しかないと仮定しても、量子状態の総数は、 2^N という膨大な数になる。実際には、気体分子は自由に動くし、エネルギー準位も多数あるので、取りうる状態の数は、有限とはいえ、極めて大きな数になる)。さらに、量子統計力学は、この気体の系が取りうるどの量子状態にある確率も等しいとの唯一の基本仮定を持つ。

さて、この気体の系を「孤立系」(外界とエネルギーと物質との交換のない系。すべての物理量が一定になる) としよう。次に、この系を二つの系 1 と系 2 とに分割し、互いにエネルギーの交換が許されるような接触 (互いに「閉じた系」であるという。粒子の交換も許されれば「開いた系」と呼ぶ) をさせる。体積は、 $V = V_1 + V_2$ で変化しない。粒子数も、 $N = N_1 + N_2$ で変化しない。エネルギーは、 $U = U_1 + U_2$ で、 U が一定の条件の下、 U_1 と U_2 とは互いに变化しうる。このとき、これらの系 (まとめて「複合系」と呼ぶ) の取りうる量子状態の総数 $g(U, V, N)$ は、 $U_1 \leq U$ となるすべての U_1 の値について和を取って、

$$g(U, V, N) = \sum_{U_1} g_1(U_1, V_1, N_1) g_2(U_2, V_2, N_2) \text{ で与えられる。}$$

複合系が互いに熱平衡に達したとき (十分な時間、エネルギー交換を行い、交換がなくなるとき)、この分割された系は、上式右辺の和の中で最大の項の量子状態 (特定の U の分配) にある。このように、特定の U に属する量子状態が多数あることを量子状態の縮退と呼ぶ。

ところで、この最大の項は、他を圧倒して断然大きい。もし、この分割が $V_1 = V_2 = V/2$, $N_1 = N_2 = N/2$ という分割であれば、最大の項は、 $U_1 = U_2 = U/2$ という分配のとき現れる。 $N \sim 10^{22}$ 個であれば、この 50% ずつの分配から、わずか $10^{-8}\%$ ずれただけで、この分配に属する量子状態の数は、最大の項に比べ、 0 と見なせるほど小さくなる。したがって、 $N \sim 10^{22}$ 個の系では、等価な二つの系のエネルギー分配は、量子統計力学の基本仮定から 50% ずつの分配からずれた分配に属する量子状態の数が 0 ではなくとも、 $50 \pm 10^{-9}\%$ ずつの分配しかあり得ないと断言できる。

熱平衡に達したとき、 $g_1 g_2$ は最大値なので、二つの系間の無限小のエネルギー交換に対し、 $dU_1 + dU_2 = 0$ が成立し、 $g(U, V, N)$ の微分がゼロになる。すなわち、

$$dg(U, V, N) = \left(\frac{\partial g_1}{\partial U_1} \right)_{V_1, N_1} g_2 dU_1 + g_1 \left(\frac{\partial g_2}{\partial U_2} \right)_{V_2, N_2} dU_2 = 0 \quad .$$

この式を、 $g_1 g_2$ で割って、 $dU_1 = -dU_2$ を代入すると、次の熱平衡の条件、

$$\frac{1}{g_1} \left(\frac{\partial g_1}{\partial U_1} \right)_{V_1, N_1} = \frac{1}{g_2} \left(\frac{\partial g_2}{\partial U_2} \right)_{V_2, N_2}$$

が得られる。この条件は、さらに、書き換えられて、

$$\left(\frac{\partial \log g_1}{\partial U_1} \right)_{V_1, N_1} = \left(\frac{\partial \log g_2}{\partial U_2} \right)_{V_2, N_2}$$

となる。ここで、われわれは、量子統計力学のエントロピーと呼ばれる量 σ を、系に許される量子状態の総数の自然対数、 $\sigma(U, V, N) \equiv \log g(U, V, N)$ と定義する。

$$\sigma \text{ を用いると、熱平衡の条件は、} \left(\frac{\partial \sigma_1}{\partial U_1} \right)_{V_1, N_1} = \left(\frac{\partial \sigma_2}{\partial U_2} \right)_{V_2, N_2}$$

となる。熱平衡にある二つの系の温度は等しい。そこで、熱力学温度 τ の定義を、熱平衡の条件から、 $\frac{1}{\tau} \equiv \left(\frac{\partial \sigma}{\partial U} \right)_{V, N}$ と定義する。

つまり、熱力学温度とは、エントロピーの内部エネルギー依存性の逆数となる。内部エネルギーをかなり増加させてもエントロピーがそれほど増加しないとき、温度の逆数は小さくなる。このとき、系の温度は高温である。逆に、内部エネルギーをわずかに増加させるとエントロピーが大きく増加する系の温度は、低温である。

高温の系から低温の系に熱が移動すれば、複合系の量子状態の数は増加する。量子状態の数が他の分配に比べ圧倒的に大きなエネルギー分配は、他の分配に比べきわめて大きな確率で、というより、唯一の分配として存在する。

したがって、高温の系から低温の系に「熱」が移動するとは、内部エネルギーの交換を通じて、圧倒的に大きな状態の数が縮退している、事実上、唯一のエネルギー分配への移行過程と言える。

熱力学温度 τ は、内部エネルギー U の輸送方向を決める示強変数（系のサイズに依存しない物理量）である。ちなみに、圧力 p は、系の体積 V の増減方向を決める示強変数、化学ポテンシャル μ は、系の粒子数 N の増減方向を決める示強変数である。量子統計力学で扱う熱力学関数の変数が示量変数から示強変数に置き換えられるに従い、熱力学関数の適用範囲が広がり一般化される。

注) 相転移はなぜ起こるか。 粒子数 $N \sim 10^{22}$ 個の系で、エントロピー σ は重要な役割を果たす。温度 τ が一定に維持されている条件下で、エントロピーが $d\sigma$ 増加したとき、熱力学温度の定義から、系に流入した熱は $\tau d\sigma$ で与えられる。すると、系の内部エネルギー変化 dU は、系に流入した、または、流出した熱（流入なら符号は正。流出なら符号は負）と、系が外にした、または、外からされた仕事（したなら符号は正。されたなら符号は負）との和になる。系が外にした、または、外からされた仕事は、 $dU - \tau d\sigma$ で与えられることになる。温度 τ が一定なら、温度 τ を微分要素 $d\sigma$ の中に入れられる。結局、系が外にした、または、外からされた仕事は、 $dU - d(\tau \sigma) = d(U - \tau \sigma)$ で与えられる。ここで、 $F \equiv U - \tau \sigma$ と定義すれば、系が外にした、または、外からされた仕事は、 dF で与えられることになる。この F をヘルムホルツの自由エネルギーと呼ぶ。系の体積が一定のとき、粒子数 $N \sim 10^{22}$ 個の系は、最小のエネルギーと最大のエントロピーの状態を安定状態として、この状態へ移行する。このとき、ヘルムホルツの自由エネルギー F は、系が取るべき状態を F を最小にする状態として決定する。つまり、系は、系が外にしたり、または、外からされたりする仕事をできない（系の体積が

一定なので、系は、自らの体積を変えられない) ので、 $dF = 0$ の状態しか選択できない。温度 τ が上昇すると、系のエントロピを大きい状態 (固相より液相, 液相より気相の方がエントロピが大きい) に移行した方が、 F を最小にできる。粒子間相互作用のある普通の物質系で、相転移が起こるのは、 F を最小にできる相への移行した方が安定だから。

4. 2. 2 熱力学温度と国際実用温度

熱力学温度 τ の定義から、熱力学温度の単位は、エネルギーの単位 J であることが分かる。もし、我々が日常的に熱力学温度 τ を使うのなら温度の単位 (基本単位の一つ) K は不要になる。しかし、SI 単位系ができる前から広く使われている実用温度 T を使い続けているので、両者を繋ぐ関係が必要となる。その関係は、 $\tau = k_B T$ である。ここで、 k_B はボルツマン定数という普遍定数で、 $k_B = 1.38065 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ である。この値は、気体分子 1 個が、温度 1 K あたりに持つ運動エネルギーに相当する。

国際実用温度は、水の 3 重点 (圧力 609 Pa , 温度 273.16 K (0.01°C) のとき、水・水蒸気・氷の 3 相が共存) を含む 17 個の定義定点で定義される (「理科年表」の「1990 年国際温度目盛 (ITS-90)」参照)。セルシウス温度目盛と国際実用温度目盛との温度間隔は共通である。

4. 2. 3 実用温度測定法

1) 液体の熱膨張による測定

液体の熱膨張が温度にほとんど依存しないことを利用して、温度を測定する方法である。液体 (感温液) をガラス管に封入し、ガラス管下部に球状の感温液溜まりを設け、その上部に感温液柱となる細管がある。一般に、「ガラス製棒状温度計」と呼ばれる。

感温液は、水銀と赤 (青) く着色された有機液体とに大別される。有機液体の熱膨張は水銀の数倍大きいので、有機液体温度計の指度は見やすい。しかし、有機液体は感温液柱内壁をぬらすので、有機液体温度計の精度は、水銀温度計に比べ劣る (水銀はガラスをぬらさない)。

測定温度領域は、感温液が液相である領域に限られるので、他の測定法に比べ狭い。通常、水銀温度計で -30°C から $+360^\circ\text{C}$ まで、有機液体温度計で -100°C から $+200^\circ\text{C}$ までである。

棒状温度計の測定対象は、液体または気体に限られる。また、棒状温度計の全体、または、球部を含む大きな部分を測定対象の液体・気体に浸けなくてはならない。そのうえ、球部の感温液が測定対象と熱平衡に達するのに要する時間 (熱時定数) が数分と長い。

水温や気温の測定に使われるので、日常生活では身近な温度計だけれど、使いづらい点が多く、学術研究にはほとんど用いられない。

2) 固体の電気抵抗による測定

固体の電気抵抗 (電気伝導) の温度依存性を利用して、温度を測定する方法である。この方法で用いる機器は、電気抵抗測定のための 2 本の導線を接続した固体感温素子と測定回路とから構成される。感温素子の素材は、金属と半導体とが使われている。金属に、白金 Pt の細線が、半導体に、多種類の金属酸化物粉末を混合・焼成したセラミックが用いられることが多い。

白金の細線を用いる感温素子を白金測温抵抗体と呼ぶ。この素子は、通常、 0°C での電気抵抗が 100Ω の白金細線を巻き付けた円筒をステンレスパイプの容器に密封してある。測定温度領域は、 -200°C から $+650^\circ\text{C}$ までである。

白金の電気抵抗は、温度増加に伴い線形に増加し、かつ、経時変化も少ないので、高精度測

定が可能である。したがって、白金は感温素子として優れた特性を持つと言える。しかし、測温体のサイズが大きいため、表面や微小物体の測温に使えない。そのうえ、大きなサイズのため、熱時定数も長い。このように、棒状温度計同様、使いづらい点が多く、学術研究には、高精度を特に要する場合以外、あまり用いられないし、日常生活では全く用いられない。

一方、金属酸化物セラミック（サーミスタ）の電気抵抗は、温度増加に伴い指数関数的に減少し、かつ、急激に電気抵抗が減少する温度帯を金属酸化物組成により選ぶことができる。感温素子のサイズを 1mm 程度まで小さくできるので、熱時定数は短く、測定対象は気体から小サイズの固体まで幅広い。測定温度領域は、組成を調節した様々な感温素子の領域を合わせると、 -100°C から $+1000^{\circ}\text{C}$ までである。ただし、1 種類の感温素子の測定温度幅は、200K 程度と狭い。金属酸化物組成のばらつきのため、感温素子の電気抵抗の温度依存性の再現性が悪いので、精密な測定には、感温素子ごとの温度較正が不可欠である。

1 種類の感温素子の測定温度幅の狭さと温度特性の再現性の悪さから、サーミスタは、学術研究にはあまり用いられない。しかし、感温素子を小型にでき、かつ、安価なので、温度制御回路の感温素子として、家庭電化製品や自動車に幅広く利用されている。室温設定機能を持つ石油ストーブの室温検出素子として、電気こたつの加熱温度検出素子として、あるいは、自動車エンジンの冷却水温・排気温検出素子として、多数のサーミスタが用いられている。

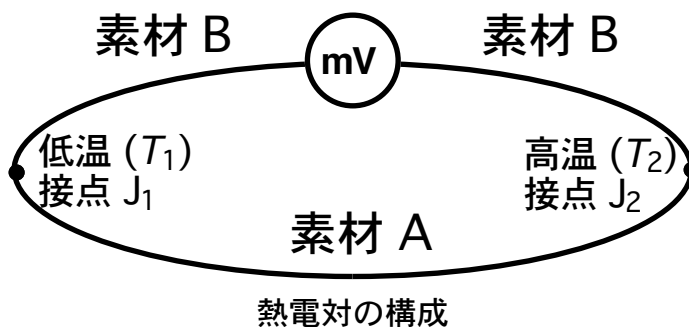
3) 熱起電力による測定

熱起電力とは、2 種の異なる金属または半導体の両端を接合して、2 接点を異なる温度に保つとき、この回路に生ずる起電力である。

1821 年、Thomas Johann Seebeck (ドイツの物理学者・医師, 1770-1831) が、熱起電力によって回路に熱電流が流れる現象を発見した (ゼーベック効果)。この効果の一部は、異種の金属または半導体の接点に電流を流すと、接点でジュール熱以外の熱の発生または吸収が起こる効果で、1834 年、Jean Charles Athanase Peltier (フランスの物理学者, 1785-1845) が発見した (ペルティエ効果)。ペルティエ効果は、半導体の Bi-Te 合金を用いた電子冷却素子 (ペルティエ素子) として実用化され、車載用小型冷蔵庫や、近年、CCD や CPU などの局所冷却に用いられている。特に、冷却型 CCD は、雑音電圧を著しく減少させ、わずかな光量の映像、たとえば天文写真の撮影に威力を発揮している。

ゼーベック効果の残りの部分をトムソン効果と呼び、1851 年、William Thomson 後の Lord Kelvin (イギリスの物理学者, 1824-1907) が発見した。トムソン効果は、場所によって温度の異なる金属または半導体に電流を流すと、導体または半導体にジュール熱以外の熱の発生または吸収が起こる現象である。

熱起電力を生ずるように、異なる素材の金属線の一对を接合した金属線対を、熱電対と呼ぶ (右図)。



この熱電対の起電力 $E(T_1, T_2)_{A,B}$ は、

$$E(T_1, T_2)_{A,B} = V(T_2)_{A,B} - V(T_1)_{A,B} + \int_{T_1}^{T_2} (\sigma_B - \sigma_A) dT$$

で与えられる。

ここで、 $V(T)_{A,B}$ は温度 T における素材 A, B 間の接触電位差、 σ はトムソン係数である。

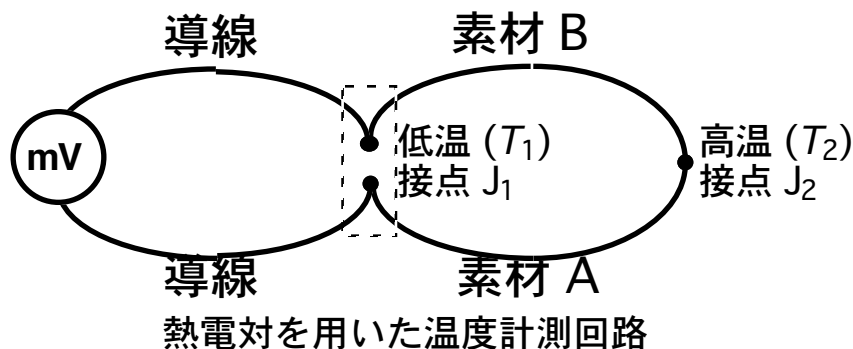
この式から、熱起電力は、異種素材の接触電位差の温度依存性（ペルティエ逆効果）と、各素材の温度差によるトムソン効果の差との和であることが分かる。

一般に、熱起電力 $E(T_1, T_2)$ は、 $(T_2 - T_1)$ のある範囲内で、

$$E(T_1, T_2) = a(T_2 - T_1) + (b/2)(T_2^2 - T_1^2)$$

の形になって (a, b は定数)、 T_1 を一定に保てば、 $T_2 = -a/b$ の温度で、起電力が極大となる。起電力が極大となる温度を、中立温度と呼ぶ (T_1 に無関係)。

熱電対の低温接点の温度を一定に保てば、熱起電力は高温接点の温度のみで決まるから、熱電対を温度計として使用できる。この温度計測回路の構成は、熱電対・低温接点・補償導線・電圧計のみと簡便である (右図)。



熱電対の一脚素材に純金属線が、+脚素材に合金線が使われることが多い。このタイプの熱電対の起電力は、ばらつきが少なく、かつ、経時変化も少ない。この特長と、熱時定数が短く、金属線を細くすれば測定対象を選ばない汎用性ことから、多くの学術研究で、熱電対は最も多用されている温度計で、手軽で高精度の温度測定法として確立されている。そのうえ、測定温度領域は、 -200°C から $+2000^{\circ}\text{C}$ 以上と極めて広い。ただし、実験室で使われる熱電対は、測定温度領域に中立温度がなく、熱起電力が温度の一次関数に近いものが選ばれている。

日本工業規格 (JIS) 登載の 8 種の熱電対のうち、4 種 (S, R, K, T) の標準熱起電力が、「理科年表」に掲載されているので、参照すること。JIS 規格外にも、イリジウム-ロジウム熱電対 (Ir 60%, Rh 40% - Ir 100%) タングステン-レニウム熱電対 (W 74%, Re 26% - W 94%, Re 6%) など、 2000°C を超える高温用熱電対を中心に多くの種類がある。

日常生活で、熱電対を見かけることは少ないけれど、身近には、ガス器具の立ち消え防止装置にクロメル・アルメル熱電対 (JIS 呼称: K) が使われている。安価で、熱起電力が大きい (0°C 低温接点に対し、 1000°C のとき 40 mV) ので利用されている (そのかわり、熱電対の素線がいずれも合金線なので、経時変化が大きい)。ガス燃焼時に、熱電対が発生させる熱電流が、ガス流を開閉する電磁弁を開かせている (したがって、無電源で動作する)。

4) 光の放射による測定

前 3 者の計測法はいずれも、感温素子が測定対象に接触し、測定対象と熱平衡に達することで、感温素子の温度を測定対象の温度と同一とみなし、感温素子の温度特性を利用して、感温素子の温度 (すなわち、測定対象の温度) を知る。

これに対し、光の放射による測定は、物体が温度に応じた光を放出することを利用して、物体の放射光のエネルギー分散、または、エネルギー総量を測定し、物体の温度を知る方法である。測定原理から、測定機器は、測定対象と非接触で、かつ、測定対象と熱平衡にない。

光の放射による温度測定機を放射温度計と呼ぶ。放射温度計は、測定対象が放出する光を光学的に集光する光学系と、集光した光を電気信号に変換し温度を計測する電気系とで構成される。集光した光の電気信号への変換には、大別して次の 2 種の変換素子が用いられる。広帯域の光放射のエネルギー総量を測定し温度に変換するエネルギー強度型、特定波長の光強度を測定し温度に変換する波長分散型。

エネルギー強度型素子には、サーモパイルが使われることが多い。サーモパイルは、多数の熱

電対を直列に接続した素子である。サーモパイルの高温接点に集光し、高温接点の温度上昇に伴う熱起電力から、集光した光のエネルギーを測定する。そのためには、低温接点の温度を知る必要があるため、低温接点にサーミスタ温度計を設置し、低温接点の温度を計測している。

波長分散型素子には、多種類の半導体素子が使われる。半導体は、バンドギャップのエネルギー差に相当する光を吸収し、伝導帯に電子を励起し、電気抵抗が減少する。このとき、半導体をダイオード接続していれば、起電力が発生する。この起電力、または、電気抵抗を測定し、半導体特有の吸収波長の光の強度を測定する。半導体には、室温程度の物体が放射する赤外線吸収する PbS や PbSe から、3000°C を越える高温の物体が放射する可視光を吸収する Si まで、多種類の半導体が使われている。

物体が放射する光のエネルギーや波長分散を測定すると、どうして、離れたところにある物体の温度を測定できるのだろうか。

この測定の原理の出発点は、1900年、Max Karl Ernst Plank (ドイツの物理学者、1858-1947) が提起した光量子仮説 (振動数 ν の光がもつエネルギーは、振動数にプランク定数 h をかけた $h\nu$ を最小単位とし、必ずその整数倍になっている) である。

この仮説から、次のプランクの輻射則が得られた。この法則の導出を、量子力学・量子統計力学の初歩的教科書 (たとえば、岸野正剛著、「今日から使える量子力学」、講談社、2006年、pp. 8-24 ; チャールズ・キッテル、ヘルバート・クレーマ著、山下・福地訳、「キッテル熱物理学第2版」、丸善、1983年、pp. 71-77) で確認しておくことが望ましい。

プランクの輻射則で、物体が放射する単位体積あたり単位振動数領域あたりのエネルギー (スペクトル密度) u_ω は、次式で与えられる (ω は光の角振動数。 $\omega = 2\pi\nu$)。

$$u_\omega = \frac{\hbar}{\pi^2 c^3} \frac{\omega^3}{\exp\left(\frac{\hbar\omega}{\tau}\right) - 1}$$

ここで、 c は光速、 \hbar はプランク定数を 2π で割った定数 ($h\nu = \hbar\omega$ になる)、 τ はエネルギー換算された物体の温度である。上式の ω 依存性は、次のように理解できる。 $\omega \geq 0$ の領域で、 ω の増加に伴い、 $\exp\left(\frac{\hbar\omega}{\tau}\right)$ は、1 から ∞ に単調増加するので、 $\exp\left(\frac{\hbar\omega}{\tau}\right) - 1$ は、0 から ∞ に単調増加する。すると、 $\exp\left(\frac{\hbar\omega}{\tau}\right) - 1$ の逆数である $\left\{\exp\left(\frac{\hbar\omega}{\tau}\right) - 1\right\}^{-1}$ は、 ω の増加に伴い、 ∞ から単調減少し、0 に漸近する。一方、 ω^3 は、 $\omega \geq 0$ の領域で、 ω の増加に伴い、0 から ∞ に単調増加する。 u_ω は、定数部分を除くと、単調増加する ω^3 と単調減少する $\left\{\exp\left(\frac{\hbar\omega}{\tau}\right) - 1\right\}^{-1}$ との積になっているから、 ω の増加に伴い、0 から増加し、最大値を経て、減少し、再び0に漸近する ($0 \times \infty = 0$ に注意)。最大値は、 ω^3 と $\left\{\exp\left(\frac{\hbar\omega}{\tau}\right) - 1\right\}^{-1}$ とが同じ値を取る (グラフ上で、交叉する) とき、現れる。さらに、物体の温度 τ が高くなると、 $\left\{\exp\left(\frac{\hbar\omega}{\tau}\right) - 1\right\}^{-1}$ の単調減少が緩やかになるので、最大値が現れるのは、 ω がより大きく (光の波長がより短く) なるときになる。したがって、この式は、古典物理学が説明できなかった次の事実を説明した。

スペクトル密度に最大値があり、その最大値が温度上昇とともに短波長に移動すること (温度が高くなると、物体が赤い光から青白い光を放つようになること) を説明できた。その結果、

波長分散型素子が吸収する特定の角振動数 ω の光のスペクトル密度 u_ω を測定できれば、物体の温度 τ がわかる。

ここで、スペクトル密度 u_ω を全角振動数にわたって積分すれば、単位体積あたりのエネルギー密度 U/V が、次のように、与えられる。

$$\frac{U}{V} = \int_0^\infty u_\omega d\omega = \frac{\hbar}{\pi^2 c^3} \int_0^\infty \frac{\omega^3}{\exp\left(\frac{\hbar\omega}{\tau}\right) - 1} d\omega$$

ここで、 $x \equiv \frac{\hbar\omega}{\tau}$ において、積分の変数を ω から x に変換する。直ちに、 $\omega = \frac{\tau}{\hbar} x$ 。

$\frac{dx}{d\omega} = \frac{\hbar}{\tau}$ だから、 $d\omega = \frac{\tau}{\hbar} dx$ となる。すると、上の積分は書き換えられて、

$$\frac{U}{V} = \frac{\hbar}{\pi^2 c^3} \int_0^\infty \frac{\frac{\tau^3}{\hbar^3} x^3}{e^x - 1} \frac{\tau}{\hbar} dx = \frac{\tau^4}{\pi^2 \hbar^3 c^3} \int_0^\infty \frac{x^3}{e^x - 1} dx$$

となる。

ここで、積分公式 $\int_0^\infty \frac{x^3}{e^x - 1} dx = \frac{\pi^4}{15}$ を利用すると、 $\frac{U}{V} = \frac{\pi^2}{15 \hbar^3 c^3} \tau^4$ となる。

この放射のエネルギー密度が放射する物体の温度の4乗に比例するという結果を、ステファン・ボルツマンの放射則と呼ぶ。サーモパイルの温度上昇を測定できれば、温度上昇の原因となった光を放射する物体の温度 τ がわかる。

さらに、ステファン・ボルツマンの放射則から、物体からまわりの空間に、物体の表面の単位面積あたり・単位時間あたりに放出されるエネルギー（流束密度） J_u が得られる。流束密度 J_u は、単位面積を底面とし、単位時間に光が進む距離（光速 c ）を高さとする直方体に含まれる

エネルギーで、 $J_u = \frac{c}{4} \frac{U}{V} = \frac{\pi^2 \tau^4}{60 \hbar^3 c^2}$ で与えられる（実際には、さらに、幾何学因子 $1/4$ を乗ずる）。

流束密度を実用温度 T から求められるように変形すると、 $J_u = \frac{\pi^2 k_B^4}{60 \hbar^3 c^2} T^4 = \sigma_B T^4$ となる。

ここで、 σ_B は、流束密度の式のうち温度 T 以外の定数部分をまとめた定数で、 $\sigma_B \equiv \frac{\pi^2 k_B^4}{60 \hbar^3 c^2}$ と定義され、ステファン・ボルツマン定数と呼ばれる。

こうして、対向しておかれた高温 τ_h の物体と低温 τ_l の物体との間で、 τ_h^4 と τ_l^4 との差に比例する熱輸送が起こる（4乗の差なので、わずかな温度差でも、大量の熱輸送になる）。非接触で生じる物体間の光の放射による熱輸送を、熱放射という。一方、物質の移動なしに、互いに接触する高温物体から低温物体に熱が移動することを熱伝導と呼ぶ。熱放射・熱伝導に対流

を加えて、熱の輸送機構と呼ぶ。

ただし、対流は、温度上昇による熱膨張で密度が低下した気体、または、液体（総称して、流体）が浮力により運動して熱を輸送する機構で、重力場にある流体でしか起こらない。したがって、対流は普遍的な熱輸送機構ではない。

たとえば、地表で、ロウソクの炎は、炎に加熱された空気の対流により、涙滴型になる。ところが、微小重力（注参照）下で、対流が生じないので、ロウソクの炎は球状になる。このとき、周囲の温度一定なら、炎で発生する熱は、熱伝導と熱輻射とにより、等方的に散逸する。

注) 微小重力. 宇宙には、遠近の別はあるものの、どこでも質量が分布している。したがって、「無重力」はあり得ない。正しくは、「微小重力」と呼ぶ。また、地表近く数 100 km の高度で地球を周回する宇宙ステーションの重力加速度は 0 ではなく、地球の重力加速度が位置により異なるので、地表の重力加速度の $\pm 10^{-6}$ 程度の変動がある。

4. 3 原理その 2, 光

4. 3. 1 光とは何か

1) Maxwell の電磁理論

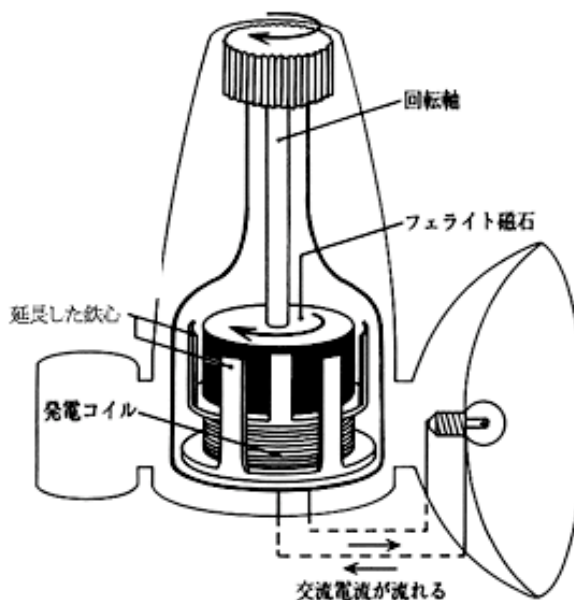
1864年, James Clerk Maxwell (イギリスの物理学者, 1831-1879) は、次の電磁場の 4 法則を統合した電磁理論を確立した。(i) 電流の造る磁場を与えるビオ・サバールの法則, (ii) 磁場の変化によって生じる起電力を与えるファラデーの法則, (iii) 媒質中の自由電荷により生じる電場の強さを与えるガウスの法則, (iv) 媒質中の磁場の強さを与えるアンペール・マクスウエルの法則。これらの法則は、いずれも 19 世紀半ばまでに、個別に確立されていた。

Maxwell は、これらの法則を、次の 4 つの方程式（次の方程式は積分形式。微分形式の方程式もある）にまとめた（式の順番は、上記の法則の順番と同じ）。

$$\oint_l \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \epsilon_0 \int_S \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S}, \quad \oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S}, \quad \int_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{Q}{\epsilon_0}, \quad \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0.$$

ここで、 \mathbf{E} は電場ベクトル、 \mathbf{B} は磁場ベクトル、 l は線積分路、 S は積分閉曲面、 Q は閉曲面内部の全電荷、 μ_0 は真空の透磁率、 ϵ_0 は真空の誘電率を示す。ここで、Maxwell の方程式の説明をする紙幅がないので、次の本を読むことを薦める。ダニエル・フライシュ著、河辺哲次訳、「マクスウエル方程式 電磁気学がわかる 4 つの法則」、岩波書店、2009 年。

白転車の発電ランプの仕組み



TDK 株式会社の WebSite 「じしゃく忍法帳」
<http://www.tdk.co.jp/techmag/ninja/daa31000.htm>
から。

さらに、Maxwell は、これらの方程式のうち、第 1 式と第 2 式とを結合し、電場・磁場の時間的変化が波動になることを予測した。すなわち、電磁波の存在を予言した。

第 1 式は、変動電場がそれを囲む循環磁場を発生させることを、第 2 式は、変動磁場がそれを囲む循環電場を発生させることを意味する。これらの法則が単独に利用されているのが、電動モータ(第 1 式)であり、交流発電機(第 2 式)である。

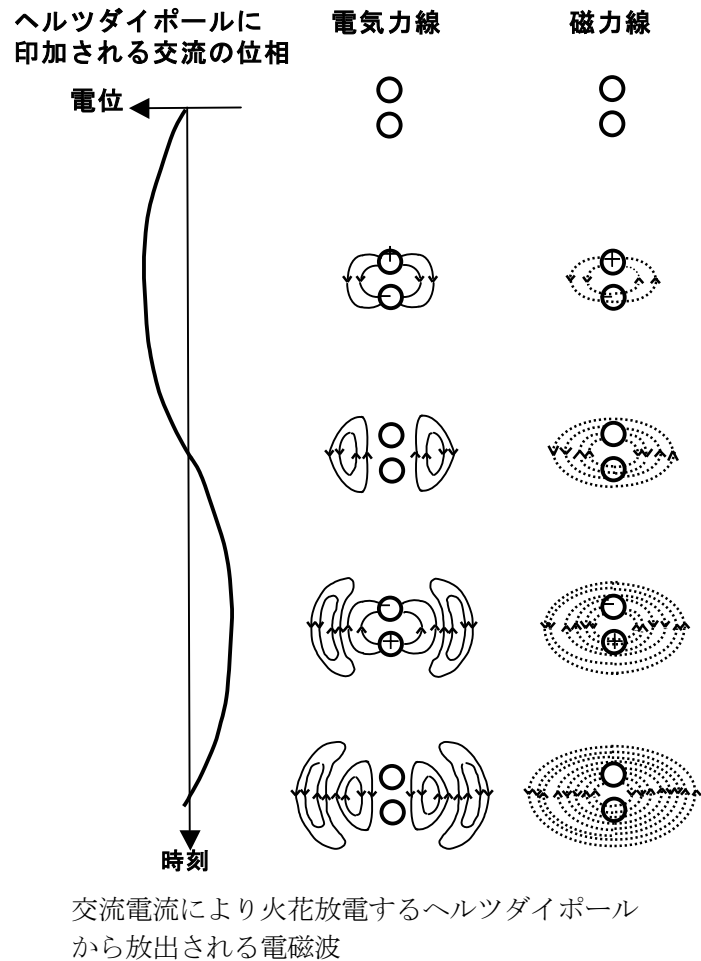
自転車用発電機(前頁図)のフェライト磁石は、中心に穴の空いた厚い円板を 8 等分した形(切り分けたバウムクーヘンの形)の磁石を、外側が交互に N 極, S 極となるように並べて接着したような多極磁石である(実際に接着はしていない。円板のまま多極着磁している)。多極着磁により、円板 1 回転で、磁場の方向が 8 回反転し、変動磁場の変化率が大きくなり、起電力を大きくできる。

2) Hertz の放電実験

Maxwell が、変動する電場と磁場とからなる電磁波の存在を予言したことを受け、1888 年、Heinrich Rudolf Hertz(ドイツの物理学者、1857-1894)は、2 個の金属小球(ヘルツダイポール)をわずかな間隔を隔てて相対させ誘導コイルに接続し、火花放電させ、近くに置いた小間隙を持つ円輪の間隙に火花が発生することを発見した(右図)。こうして、Hertz は、電磁波の存在を証明した。

2 個の金属小球の間に誘導コイルの交流電圧が印加されると、小球を結ぶ線分方向の時刻と共に変動する電場が形成される。すると、電場の方向に垂直の同心円上の磁場が形成される。したがって、電場と磁場とは、常に垂直になる。金属小球間の放電電流は周期的に変動するから、変動電場がその垂直方向に変動磁場を生み、変動磁場がその垂直方向に変動電場を生む連鎖反応が起きる。その際、古い電場・磁場は、新しい電場・磁場によって外側に押し出される。このように空間に押し出され、空間を伝わる波を電磁波と呼ぶ。

こうして、電磁波とは、真空中や物質中を伝わる電磁場の振動であることが分かった(物理量の変化が時間とともに周期的に変化するのを振動と呼び、同変化が時間と空間との両方で周期的に変化する振動を波と呼ぶ)。



3) 電磁波の波長と放出系

Maxwell の方程式の第 3 式と第 4 式とから、電荷は、そのまわりの空間に放射状の電場を形成し、運動する電荷は、運動方向に同心円上の磁場を形成することが分かる。変動電場は、電荷の運動により生じる。変動電場は、同時に、変動磁場も生み出す。こうして、変動電磁場は、エネルギーを伴って、空間に放出される連続的な波、すなわち、電磁波として現れる。

電磁波のうち、波長が 0.1 mm 以上の電磁波である電波は、変動電磁場に起因する連続的な波として説明できる。ところが、波長が 0.1 mm 以下の電磁波、特に、可視光と、可視光より波長の短い光で、連続的な電磁波の放出として理解できない離散的な光スペクトル（線スペクトル）の存在が、20 世紀初頭に判明した。離散的な光スペクトルを説明するには、これらの光を出している電子が、離散的なエネルギー準位の間を遷移し、エネルギー準位差に等しいエネルギーを光子として放出しているとみなす必要があった。連続的なエネルギー・波長を持つ長波長側の電磁波と大きく異なる短波長側の電磁波の放出機構が、1930 年代に確立された量子力学によって解明された。このように、電磁波の波長と放出機構とは、古典領域と量子領域とで大きく異なる。

電磁波の全領域のうち、電波が古典領域、電波のうち短波長のマイクロ波と遠赤外線より波長の短い電磁波（光）が量子領域に対応し、マイクロ波は両領域が重なっている。

波長の帯域により、電磁波には名称がある（付録の「光マップ」参照）。この名称は、電磁波の放出系と深く関連している。波長の短い方から、電磁波の放出系は、次のようになっている。

- ・量子領域
 - γ 線：原子核、
 - X 線：原子の内部電子、
 - 紫外線・可視光線：原子の外部電子、
 - 赤外線・遠赤外線・マイクロ波：分子や固体の振動・回転。
- ・古典領域
 - マイクロ波を含む電波：電子・原子核と外部場との相互作用。

4) 電磁波の放出機構

4. 1) γ 線

γ 線は、不安定な原子核から放出される（不安定の原因は、原子自身の不安定な核子構成と、外部からの高エネルギー粒子線吸収とがある）。原子核は、直径 10^{-14} m 程度の狭い空間（原子の大きさは、直径 10^{-10} m 程度なので、原子核の大きさは原子の 1 万分の一しかない）に、正の電荷を持つ陽子と電荷を持たない中性子とが詰め込まれている。陽子間に働く巨大な静電斥力（電荷間距離が小さいので巨大になる）を押さえ込むもっとも巨大な核力によって原子核としてのまとまりを維持している。

こうした強い束縛のもと、原子核内で運動する陽子・中性子は、不安定状態解消のため原子核崩壊するとき、 γ 線を放出する。原子核内で運動する陽子・中性子のエネルギー準位は、離散的なので、 γ 線の波長は、元素ごとに定まっています、10 fm から、10 pm の領域にある。この長さは、原子核の大きさから、原子より少し小さい大きさに対応している。このことは、電磁波の波長は、変動電場を発生させる荷電粒子の運動領域の大きさで決まることを意味する。

γ 線の波長を測定すれば、放射性元素を特定できる。また、 γ 線の本数を測定すれば、放射性同位元素の半減期から、放射性同位元素の量が分かる。

たとえば、カリウム K(原子番号 19)には、安定な ^{39}K 、 ^{41}K と、不安定で放射性の ^{40}K の 3 種の同位体がある（元素記号の前の数字は、質量数（陽子と中性子、つまり、核子の数）。質量

数から、これらのカリウム同位体の原子核には、中性子が、それぞれ、20、22、21個ある)。

^{40}K の半減期は約19億年と長いので、46億年前の地球誕生時の ^{40}K が残っていて、今も、エネルギーが1.46 MeVの γ 線を放出し($1\text{eV} = 1.60219 \times 10^{-19} \text{J}$)、安定な ^{40}Ar に変わっている。 ^{39}K 、 ^{40}K 、 ^{41}K の3種の存在比は、それぞれ、93.22%、0.0117%、6.77%で、放射性Kは最も少ない。しかし、Kは地殻に2.59重量%も含まれ、食物を通して体内に摂取され、体内被爆を引き起こす。Kを多く含む食品から、1.46 MeVの γ 線を容易に計測できる。たとえば、乾燥昆布、干椎茸1 kgから、1秒間に、それぞれ約2千本、約7百本の γ 線が放出されている。

4. 2) X線

原子番号の大きな原子(それぞれ同数の陽子と電子とを多数抱えている原子、もちろん陽子の数以上の中性子も抱えている)で、その原子核に最も近い電子(最もエネルギー準位が低い、すなわち、最も強く原子核に束縛されている)に、束縛以上の高エネルギーを持った電子が衝突すると、最も低いエネルギー準位から原子外にはじき出される。衝突した電子も原子外に飛び去る。すると、直ちに、この原子の外側の電子が、多くの中間のエネルギー準位を飛び越して、一番内側の準位に落ち込む。このとき、落ち込んできた電子が、大きなエネルギー差に相当する短い波長の電磁波を放出する。この電磁波が、X線である。

こうして発生するX線は、近くの電子と衝突してエネルギーの一部を失い、より長波長のX線になる(これをコンプトン散乱と呼ぶ)。X線の波長は、10 pm から10 nmの範囲にある。

前者を特性X線、後者を連続X線と呼ぶ。原子番号の大きな金属を陽極にしたX線管の陰極・陽極間に数10 kVの高電圧を印加し、高速電子を陽極に衝突させると、X線が発生する。

こうして発生する特性X線の波長は、固体の原子間距離とほぼ同じ長さを持つ。そのため、原子が規則正しく並んだ固体に特性X線が入射すると、特有の回折を起こす。この回折から、固体の原子の並び方、すなわち、結晶構造を解明できる。X線回折に最もよく使われる陽極に銅を用いたX線管の出す特性X線($\text{Cu K}\alpha_1$ と呼ぶ)の波長は、0.1540 nmである。

一方、医療用X線に、タングステンWなどもっと原子番号の大きな元素を陽極に用いたX線管の連続X線が用いられる(連続といっても、波長が連続しているだけで、放出は一瞬)。連続X線は、特性X線より長波長、すなわち、低エネルギーで、人体への被爆効果が小さい。人体を構成する元素は軽い元素が多いので、長波長のX線でも十分人体を透過する。

人体を構成する元素で、原子番号の大きなカルシウムCaは、連続X線を良く吸収する。そのため、Caを多く含む骨は、人体の他の部分より連続X線を良く吸収するので、X線写真で、まわりより白く写る(X線が吸収されず、フィルムに多くのX線が当たれば、フィルムは黒変する)。また、炎症を起こしている部分に、血液が集まる。血液のうち、赤血球には鉄イオン4個を含むヘモグロビンが多量にある。このヘモグロビンのFeによるX線吸収のため、炎症部分も白く写る。こうして、医師は、人体の一部の透過X線写真(いわゆる「レントゲン」)から、骨折や炎症を容易に診断できる。

4. 3) 紫外線・可視光線

紫外線の波長は、10 nm から0.2 μm の範囲、可視光の波長は、0.4 μm から0.7 μm の領域にある。これらの領域を含む10 nm から1 μm の波長の電磁波は、原子に束縛されている電子のうち、比較的弱い束縛を受けている電子(外殻電子と呼ぶ)のエネルギー準位間の遷移で放出される。外殻電子は、原子核から離れて運動し、かつ、互いに近いエネルギー準位間を遷移する。そのため、長波長の電磁波(光)を放出する。

可視光の波長は、ヒトの網膜の桿体細胞と錐体細胞とにある視物質分子に束縛されている電子の遷移のエネルギー準位の差で決まる。可視光の放出とは逆の過程、すなわち、可視光のみの吸収が視物質によって行われる。可視光を吸収した視物質は、興奮伝達物質を放出し、最終的に脳がこの興奮を受け取り、情報処理し、ヒトは視覚を得る。

最も身近な紫外線源は、太陽と殺菌灯である。殺菌灯は、微量の水銀 Hg を封入したガラス管に 2 個の電極を設置し、電極間に電流を流し、ガラス管内を運動する電子により蒸気となっている Hg 原子の外殻電子を、高いエネルギー準位に跳ね上げ、紫外線と可視光とを放出させている (Hg は常温で液体の唯一の金属。蒸気圧が高く、低圧ガラス管内で気体になっている)。

殺菌灯のガラス管の内側に蛍光物質を塗布し、Hg 原子の出す紫外線を吸収させ、可視光を放出させるようにしたのが、蛍光灯である。紫外線により、蛍光物質の分子に束縛されている外殻電子のエネルギー準位間の遷移により、可視光が放出されている。紫外線で跳ね上げられて、遷移するエネルギー準位の差は、紫外線のエネルギーより小さいから、放出光の波長は長波長、すなわち、可視光になる。

4. 4) 赤外線・遠赤外線・マイクロ波

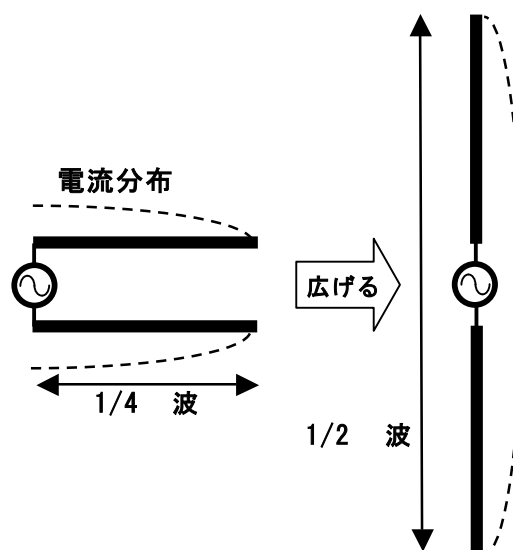
赤外線・遠赤外線の波長は、1 μm から 0.5 mm の範囲、マイクロ波の波長は、0.5 mm から 1 dm の領域にある。これらの領域を含む 1 μm から 1 dm の波長の電磁波は、気体分子の伸縮・湾曲・回転などの運動や、固体格子の振動によって放出される。これらの運動に伴い、分子に束縛されている電子も運動するから、振動エネルギー準位の差に相当する電磁波を放出する。この差は、外殻電子のエネルギー準位差よりかなり小さいので、長波長になる。

マグネトロン・クライストロンなどの真空管で、特定の波長のマイクロ波を発振させて行うことができる。水分子の伸縮で放出されるマイクロ波と同じ波長のマイクロ波を発生させ、水に吸収させて水を加熱する装置が、電子レンジである。

4. 5) 電波

マイクロ波より長い波長の電磁波を電波と呼ぶ。電波のほとんどは、通信のため、人間がアンテナから放出している。アンテナとは、送信機の交流出力を電波として放出したり、受信機への交流入力を受取る装置である。ヘルツダイポールも原始的アンテナである。効率よく電波を放射・吸収するために、電波の波長に整合したアンテナの大きさがある。アンテナの大きさは、電子の運動領域の大きさに他ならない。つまり、アンテナの大きさで、送信・受信できる電波の波長が決まる。ただし、マイクロ波は、波長が短すぎて導体（金属）で作るアンテナを使わず、空洞共振器を使う。

アンテナの基本形が、半波長ダイポールアンテナである(下図)。1/4 波長の長さの平行導線(コンデンサと見なせる)に交流を流すと、導線上の電流は端が電流ゼロの定在波として分布する。しかし、導線の電流の方向が上下逆なので、微弱電波しか放出されない。そこで、平行導線



交流電源を接続した 1/4 波長の平行導線を広げてつくる 1/2 波長ダイポールアンテナ

を広げると、効率よく電波が放出される。これが半波長ダイポールアンテナ。このとき、アンテナに流れる電流の速さは光速ではない。それでも、深さ 4 千 m の海洋を津波が 7 百 km/h で進むのと同じ理由で、光速の変動電場が生じる。

半波長ダイポールアンテナの導線 1 本だけのアンテナを、1/4 波長モノポールアンテナと呼ぶ。携帯電話のアンテナが、これにあたる。携帯電話のアンテナの長さは、機種により異なる。携帯電話のアンテナは、引き出されたロッドアンテナから本体にも続いているから、ロッドアンテナの長さに、本体の長さを加えた長さが、携帯電話で使用している電波の波長の 1/4 になる。最近、携帯電話用電波の波長が短くなり、本体に埋め込まれたアンテナで十分なので、引き出しロッドアンテナのない機種がほとんどになった。

また、地面に 1/4 波長モノポールアンテナを鉛直に立て、十分な接地を取ると、電波は、水平面に沿って均一に放出される。このとき、電場は鉛直に、磁場は水平に、かつ、伝播方向に垂直に変動する（垂直偏波。一方、TV、FM 放送の電波は、水平偏波。だから、AM ラジオ内蔵の磁場検出フェライトバーアンテナを水平にし、その法線を送信所に向ける。FM ラジオの電場検出ロッドアンテナを水平に寝かし、その法線を送信所に向ける）。このタイプのアンテナの代表例が、AM 中波放送の送信アンテナである。現在、頂部容量冠を持つ円菅柱を、多数の支線で鉛直に立てるタイプが主流である（NHK 盛岡第一放送のアンテナもこのタイプ。高さ 130 m。この高さは、頂部容量冠があるので、送信周波数 531 kHz の電波の 1/4 波長よりほんの少し短くすんでいる）。

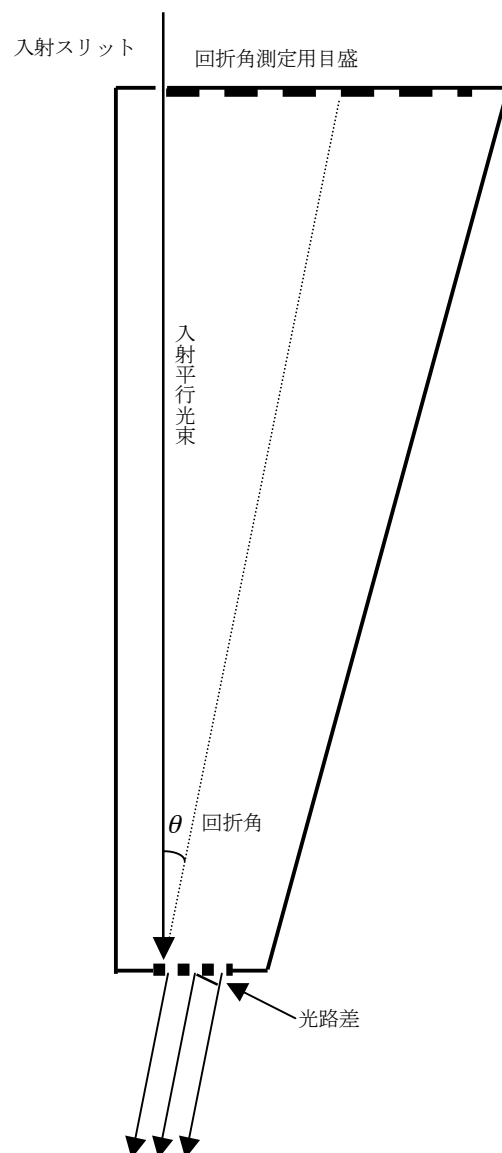
半波長ダイポールアンテナ（投射器）の前後に、長さがアンテナよりわずかに長い反射器とわずかに短い導波器とを前後に 1/4 波長離して配置したアンテナが、八木・宇田アンテナである。このアンテナは、1926 年、東北大学の八木秀次教授（1886-1976）と宇田新太郎講師（後に、教授。1896-1976）とによって発明された。世界中で、テレビジョン放送受信のため最も多用されているアンテナである。

5) 分光と回折

分光とは、プリズムや回折格子を用いて、光のスペクトルを得ることである。光のスペクトルとは、光の強度（光の振幅の絶対値の自乗）の波長または振動数依存性である。

プリズムは、その材料であるガラスがもつ光の屈折率の波長（振動数）依存性を利用して、分光する。一方、回折格子は、波長程度の間隔で並んだ多数の平行スリットを透過する、または、同様の多数の細長い反射鏡群で反射される多数の細長い光の干渉により分光する。以下に、光の回折の原理を述べる。

縦に細長いスリットから縦長の細くて長い平行光束を回折格子に垂直に入射させる。回折格子は、



簡易分光器の構造と測定原理

透明なガラス板やプラスチック板に、光を通さない細い線を平行に 1 mm につき 500 本から 1800 本描いてある（透過型）か、表面を波長の光の波長の 10 分の一以下の凹凸まで磨いた平坦な金属鏡に、光を乱反射させる溝を透過型同様の間隔で引いてある（反射型）。平行光束の長手方向と、透過型回折格子の線、または、反射型回折格子の溝とを平行に配置する。透過型回折格子の線の間の平行に並んだ細長い透明板から、多数の細長い平行に並んだ光が透過する。または、反射型回折格子の溝の間の平行に並んだ細長い反射鏡から、多数の細長い平行に並んだ光が反射する。

この波長程度の間隔で平行に並んだ多数の細長い光は、透過した透明板、または、反射した鏡の位置から、新たな光源同様、様々な方向に拡散する（もちろん、光の強度は、回折格子にスリットから入射した方向が圧倒的に強く、この方向から離れるに従い、光の強度は急速に弱くなる）。このとき、平行に並んだ光の間で、干渉（注参照）が起こる。

簡易分光器（前頁図）の入射スリットから光を入射させる。入射光は、分光器の中を進行し、回折格子に垂直に入射する。回折格子には、一定の間隔（格子定数） d で細長い透明板が並んでいる。この透明板を透過した光は、入射方向の強度が強いものの、様々な方向に進行する。このとき、入射光から 角度 θ （回折角）ずれた方向で、隣り合う細長い透明板ら進行する光に光路差が生じる。光路差は、 $d \sin \theta$ で与えられる。この光路差が、波長 λ の整数倍と一致すれば、隣り合う回折光の位相が一致し、光の振幅、すなわち、強度が強くなる。入射光が単一波長の光、つまり、単色光なら、簡易分光器の回折格子から入射スリットを覗くと、入射スリット脇に設けられた回折各測定用目盛を背景に、明るい輝線（線スペクトル）が見える。入射光が連続波長の一連の光なら、波長帯域の色の帯（連続スペクトル）が見える。

この簡易分光器では、2 波長以上の光路差による干渉（2 次以上の干渉）を観測できないので、明るく輝く線、または、帯で、 $d \sin \theta = \lambda$ が成立している。

注) **光の干渉**。二つ以上の波が進行し、同じ場所に達したとき、その場所での合成波の振幅は、成分波の振幅の和で表される。このとき、成分波の位相の差によって、合成波の振幅が変化することを光の干渉という。成分波の振幅が等しいとき、成分波の位相がちょうど 2 分の一周期異なれば、合成波の振幅は 0 になり、位相が一致していれば、2 倍になる。

4. 4 装置

温度測定：水銀体温計，サーミスタ体温計（いわゆる，電子体温計），赤外線放射体温計（いわゆる，耳式体温計）。

分光測定：簡易分光器，放電管点灯装置，放電管（Na, Hg）。

4. 5 実験課題

<体温測定>

- 1) 水銀体温計とサーミスタ体温計との両方を、どちらか一方の脇の下に挟み、10 分間じっとして体温を測る。二つの体温計の計測値に 0.2 K 以上の差があれば、反対側の脇の下で、もう一度、同じように体温を測る（注参照）。
- 2) 赤外線放射体温計を用いて、両耳で体温を測る。

注) **水銀体温計の取扱**。水銀温度計はガラスでできているので、破損しやすい。机の上に置く場合、転落させることのない位置に置くこと。また、体温測定後、水銀糸を留点より

下に下げるとき、次のように、慎重に行い、破損させないこと。球部を人差し指の腹に当て、残り 4 本の指で水銀温度計を軽く握り、腕をゆっくり振る。このとき、腕がぶつかる物体や人がまわりがないことを確認してから、腕を振ること。「設問」の注で述べたように、水銀温度計は手作りのため、高価である。その上、水銀が有毒なので、いつ製造中止なってもおかしくない。したがって、破損のないよう、注意深く取り扱うこと。

<分光測定>

- 3) Na 放電管から放出される光を簡易分光計で分光する。回折角測定用目盛上の明るい輝線 1 本の位置を読み取る。読み取った回折線と入射スリット間の距離と、入射スリットと回折格子間の距離 (260 mm) とから、回折角 θ を求める (「理科年表」の「三角関数表」を利用)。回折格子間隔 $d = 2.00 \mu\text{m}$ である。回折角と回折光の波長との関係 $d \sin \theta = \lambda$ から、Na の輝線の波長を求める。
- 4) Hg 放電管から放出される光を簡易分光計で分光する。回折角測定用目盛上の明るい輝線 3 本の位置を読み取る。Na の分光と同様に、回折角と回折光の波長との関係から、Hg の輝線の波長を求める。
- 5) 蛍光灯の光を簡易分光計で分光する。回折角測定用目盛上で帯状に分光された光の両端の位置を読み取る。さらに、この帯の中の明るい輝線 3 本の位置を読み取る。Na の分光と同様に、回折角と回折光の波長との関係から、帯状の光の最小波長と最大波長とを求める。また、明るい輝線 3 本の波長を求める。

4. 6 設問

- 1) 脇の下で測定した水銀体温計とサーミスタ体温計とによる測定値に 0.2 K 以上の差があったか。差があったのなら、その原因は何か。体温計の確度は 0.1 K 以内とされているから、0.2 K 以上の差があれば、測定法の違いに原因がある可能性がある。
- 2) 赤外線放射体温計による計測値と、水銀体温計とサーミスタ体温計とによる計測値との間に 0.2 K 以上の差があったか。0.2 K 以上の差があったのなら、その原因は何か。原因は、測定法の違いに加えて、測定位置の違いにもある可能性がある。
- 3) 水銀体温計の先端の球部に、水銀が 2.00 g 封入されているとしよう (注参照)。目盛板の温度目盛の間隔と、「理科年表」掲載の「水銀の密度」(の温度依存性)・「液体の体膨張率 (20°C)」とから水銀毛細管の内径を求めよ。

注) 水銀体温計の製造。ガラス製の水銀体温計は、全工程で、ガラス職人の手作業により作られている。そのため、球部に封入する水銀の質量も、手作りの球部の容積が一定ではないので、少しばらつく。水銀糸が上昇する毛細管も手作りなので、その内径はわずかにばらつく。そのため、球部に水銀を封入し、留点・毛細管を球部に接続後、水銀体温計を 1 本ずつ温度較正し、較正結果に合う目盛板を、目盛の位置と間隔とが微妙に異なる約 50 種類の目盛板から選んで装着している。

- 4) Na 放電管から放出される輝線の光の正しい波長を「理科年表」掲載の「紫外部、可視部、近赤外部のおもなスペクトル線の波長」で求めよ (* マークの付いた強度の大きな波長から探すこと)。簡易分光器で測定した波長と、「理科年表」掲載の波長とは一致したか。一致しないのなら、その原因は何か。

- 5) Hg 放電管から放出される 3 本の輝線の光の正しい波長を前項と同様に求めよ。簡易分光器で測定した波長と、「理科年表」掲載の波長とは一致したか。一致しないのなら、その原因は何か。
- 6) 蛍光灯の光の帯スペクトルの最大波長と最小波長とは、可視光のそれらと一致したか。一致しないのなら、その原因は何か。
- 7) 簡易分光器で測定した蛍光灯の光の 3 本の輝線の光の波長と Hg 放電管から放出される 3 本の輝線の光の波長とは一致する。なぜ、一致するのか。
- 8) 「理科年表」掲載の「紫外部、可視部、近赤外部のおもなスペクトル線の波長」で Na 放電管から放出される輝線は、わずかに波長の異なる二つの線スペクトルになっている（簡易分光器の分解能が良くないので、このわずかな波長の差の光を分離できない）。なぜ、極めて近い波長の光になっているのか（このような近い波長の基線の組は、Hg にも、他の元素が放つ光にも多数ある）。
- 9) 波長分散型放射温度計に用いられる半導体の禁制帯の幅は、PbS で 0.34 eV, Si で 1.10 eV である。PbS と Si とが吸収する光の最大波長を求めよ。これらの光の種類は何か。
- 10) 鉄芯の周囲に、導線を密に巻き付け、導線に直流電流を流すと、電磁石ができる。導線に流れる電流は、どうして磁場を作ることができるのか。鉄心は、電磁石でどのような働きをしているのか。ビオ・サバルの法則を用いて、説明せよ。

＜この課題をさらに深く学習したいものは、以下の設問にも解答すること＞

- 11) 固相の熱伝導は、フォノン伝導（フォノンは、量子化された格子振動。また、フォノンはボース粒子）と自由電子伝導（電子はフェルミ粒子）とに大別される。これらの伝導は、どういう熱伝導形式か。ところで、ダイヤモンドの熱伝導は、固体で最も良い（おおむね $900 - 2000 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）。ダイヤモンドの熱伝導形式は何か。ダイヤモンドの熱伝導率が、熱伝導が良いとされる銀や銅の熱伝導率（ $400 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ くらい）よりも大きいのはなぜか（ヒント：「理科年表」の「熱伝導率」と「金属および合金の熱伝導率」とに掲載されている 2 つの物質群の熱伝導率の差。ここでいう「物質」とは、原子レベルで均質・一様な物質に限る）。
- 12) 近年、自転車の発電機を前輪の車軸（ハブ）に組み込むようになった（ハブ・ダイナモ）。このハブ・ダイナモの発電機構はどうなっているか。自転車のこれまでの発電機（リム・ダイナモ）は、発電機先端のローラを前輪の側面（リム）に接触させることで、ヘッドライトを点灯した。しかし、自転車が動いているとき、ハブ・ダイナモはいつも回転している。どうして、常時ヘッドライトが点かないで、まわりが暗くなると、ヘッドライトが点くのか。
- 13) 太陽の表面温度は、 $5.8 \times 10^3 \text{ K}$ である。太陽表面から放出される単位面積あたり・単位時間あたりエネルギー（流束密度） J_0 を求めよ。
太陽を「太陽の赤道半径」（「理科年表」に掲載）を半径とする真球とし、太陽・地球間の距離を地球の公転軌道の「長半径」（「理科年表」に掲載）として、太陽から地球に到達する単位面積あたり・単位時間あたりエネルギー（流束密度） J_0' を求めよ（球状の太陽表面から放出された光のエネルギーが、太陽・地球間の距離を半径とする巨大な球の表面に、均等に広がると考えよ）。
このエネルギー（流束密度） J_0' は、「太陽定数」（「理科年表」に掲載）と一致するか。

一致しないのなら、その原因は何か。一致するのなら、なぜ一致するのか。

14) 前項で求めた太陽から地球に到達する光の輻射エネルギーの10-20%を、太陽電池が電気エネルギーに変換する。太陽電池は、どうやって光のエネルギーを電気のエネルギーに変換しているのか。

15) 「自転車の発電ランプの仕組み」の図で、発電機から電球に2本の電線が描かれ、それらの電線に「交流電流が流れる」との記載がある(交流電流が流れるのはホント)。ところが、実際の自転車の発電機から電球に繋がっている電線は1本しかない(ハブダイナモでも、電線は1本)。なぜ、1本の電線で電球が点くのか。

実は、自動車の電球に繋がっている電線(ワイヤハーネス)も1本しかない。電車のトロリー線(線路の上に張られた電車に電力を供給する電線。架線とも呼ぶ)も1本しかない。なぜ、1本の電線で自動車の電球が点くのか。なぜ、1本の架線で、電車のモーターが回り、車内灯が点くのか(ヒント:トロリーバスの架線は、2本ある)。

なお、現在、我が国には、長野県大田市扇沢・富山県立山町黒部ダム間6.1kmを結ぶ関西電力の関電トンネルトロリーバスと、富山県立山町室堂・同大観峰間3.7kmを結ぶ立山黒部貫光の立山トンネルトロリーバスとの2路線しかない。

付録. 単位系が分かれば、物理学が分かる

1. **現代の単位**：使用できるのは、国際単位系（SI 単位系）の単位のみ。アールだの mmHg などの使用を推奨しない。まして、インチだのガロンだのパウンドだの使用は論外。
2. **単位の表記**：接頭語と SI 単位とを組み合わせる表記。単位を、必ず、立体で書く（一方、物理量を斜体で書く。sin, cos, log などの特殊関数や、微分要素 dx の d を立体で書く）。また、単位表記に使われる文字の区別は厳格である（例：キロの k は小文字のみ）。
3. **接頭語**：10 の乗数を示す記号。次のように、原則として、3 乗きざみで、プラスの乗数の記号に大文字、マイナスの乗数の記号に小文字を用いて、決められている。

24 乗：Y ヨタ，21 乗：Z ゼタ，18 乗：E エクサ，15 乗：P ペタ，12 乗：T テラ（磁束密度の単位 T と同じだけれど，T は非常に大きな単位で，プラスの乗数を示す接頭語が付くことはないので，混同の心配はない），9 乗：G ギガ，6 乗：M メガ，3 乗：k キロ（基本単位 K との混同を避けるため小文字），2 乗：h ヘクト（インダクタンスの誘導単位 H との混同を避けるため小文字），1 乗：D デカ，-1 乗：d デシ，-2 乗：c センチ，-3 乗：m ミリ，-6 乗：μ マイクロ（これのみ，ギリシャ文字），-9 乗：n ナノ，-12 乗：p ピコ，-15 乗：f フェムト，-18 乗：a アト，-21 乗：z ゼプト，-24 乗：y ヨクト。

4. **基本単位**：SI 単位は，次の 7 個の基本単位を用いる。m（長さ），kg（質量），s（時間），A（電流），K（温度，ケルビン），cd（照度，カンデラ），mol（物質量，モル）。
5. **組立単位**：SI 単位は，7 個の基本単位を組み合わせることで，組立単位を定義する。

- ・力 N（ニュートン）= kgm/s²：質量 1kg の物体に 1m/s² の加速度が生じる原因が，1N の力。
- ・圧力 Pa（パスカル）= N/m² = kg/ms²：1 m² の面積に 1N の力が加わる圧力が，1Pa。
- ・仕事/エネルギー J（ジュール）= Nm = kgm²/s²：1N の力で物体 1m 移動させたときの仕事が 1J。
- ・仕事率 W（ワット）= J/s = kgm²/s³：1s あたり 1J の仕事をする（される）ときの仕事率が，
- ・電荷 C（クーロン）= As：1A の電流が，1s 間に輸送する電荷が，1C。└1W。
- ・電圧 V（ボルト）= J/C = kgm²/As³：1C の電荷の移動に，1J の仕事を要する電位差が，
- ・抵抗 Ω（オーム）= V/A = kgm²/A²s³：導体に，1V の電位差を与えて，1A の└1V。電流が流れるとき，導体の（電気）抵抗が，1Ω。
- ・磁束 Wb（ウエーバ）= Vs = kgm²/As²：閉回路に 1V の起電力を生じさせる 1s 当たりの磁束の変化が 1Wb。
- ・磁束密度 T（テスラ）= Wb/m² = kg/As²：1m² の面積に 1Wb の磁束が分布しているときの磁束密度が，1T。

以上は固有名称を持つ組立単位の例。固有名称を持たない組立単位（密度，面積など）もある。

6. **接頭語の使用**：SI 単位系では，大きな値や小さな値を表すのに，接頭語を使う。接頭語の使用は，10 の乗数を大きく見やすくするだけでなく，有効数字の明示にも便利。ただし，接頭語使用にはルールがある。単独の基本単位と固有名称を持つ誘導単位とに，接頭語を付ける（前者の例：km, mA，後者の例：GHz, kV, hPa, μF）。固有名称を持たない組立単位のうち，1 種類の基本単位の組立単位（面積，体積のみ）に，接頭語を付ける（例：km², cm³）。このとき，本来なら，(km)², (cm)³ と書くべき。この表記の不親切と日本の算数教育の欠陥とが，日本の子どもたちの単位換算理解を妨げている。異なる基本単位の組立単位（固有名称を持たない。例：密度 kg/m³, 速度 m/s, 粘性係数 Pa・s など）に，接頭語を付けない。
7. **単位の次元**：基本単位の構成を単位の次元と呼ぶ。物理量の相関を表す式で，左右両辺の単位の次元は常に等しい。物理量をかけたり割ったりすると，新しい単位が生まれる（たとえば，長さに長さをかけると面積。長さを時間で割ると速さ）。次元を持たない単位（平面角の rad，立体角の sr は無次元の単位）もあるので要注意。

附) 温度目盛の 1 種，セルシウス温度の記号は，°C。電荷の単位 C と区別するため，° を付ける。ファーレンハイト温度の記号 °F の ° は，同様に，静電容量の単位 F と区別するため。