

2025年版実験キットのための実験指導の手引き (教員向け資料)

はじめに

第2 チャレンジ・コンテストで使用した実験キットは、高校生や教員を対象とした実験講座で使用するとともに、一部は希望者に配布されている。しかし、コンテスト問題の文章は試験を目的に作成されているため、これらの実験キットを教育現場で使用するにあたって参照するものとして、必ずしも適切な書き方になっているとは言い難い。どの課題も問題文に忠実に従えば実験は正しく実行できるはずであるが、実験手順や注意事項の根拠が分かりにくいところや、逆に未経験者を想定しているために冗長になっている部分もある。そこで、実験キットを学習に使用するため、あるいは学習指導に利用する方のための補足資料として、この「実験指導の手引き」を執筆した。実験キットを有効に利用し、物理教育の推進と普及に役立てていただければ幸いである。

目次

課題1 コンデンサー

課題2 コンデンサーと静電気

課題3 分子振動

各課題に以下のような項目を設けて説明を加えている。

1. 課題作成の背景、ねらい
2. 実験装置の概要
3. 実験に必要な環境と機器など
4. 安全管理上の注意
5. 解説と補足
6. 課題の再構成、短縮版作成へのヒント
7. 発展課題へのヒント

※生徒の力量や実験の時間に合わせて、問題文のワードファイルから適当に設問をカットして綴り合せれば、最適化したテキストが作成できる。改作へのヒントを項目6, 7に掲載しているので参考にしてください。

編集用問題文・解答用紙 (マイクロソフトワード版)

問題文： 2025-Problems_exp123.docx

解答用紙：2025-Answersheet-exp123.docx

2025年版実験キットのための実験指導の手引き (教員向け資料)

課題1 コンデンサー

1. 課題作成の背景, ねらい

本キットは平行平板コンデンサーの電気容量測定用の実験装置である。平行平板コンデンサーは高校物理の教科書で必ず取り上げられる教材であるにも関わらず、実験教材として活用されることは少ないようである。多くの高校生にとって電気容量 C 、極板の面積 S 、極板間距離 d 、そして極板間を占める誘電体の誘電率 ϵ の関係式

$$C = \epsilon \frac{S}{d} \quad (1)$$

を実験的に検証する機会はなく、式(1)は物理公式のひとつとして暗記されているのが実情ではあるまいか。真空の誘電率を ϵ_0 、誘電体の比誘電率を ϵ_r とすれば $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ である。



図1

本課題では極板間に厚さの異なる誘電体シート(テフロンシート)を挿入することにより、極板間隔を変化させて C を測定し、テフロンの比誘電率 ϵ_r を求める。この課題を通して、実験モデルの設定から、実験の進め方が持つ意味、実験グラフから情報を読み取る解析手法、実験結果の検討といった、多くの物理実験に必要な基本的スキルを評価・学習することが、ねらいである。

測定にはテスターを使うので実験は比較的簡単である。しかしテスターを使って電圧や電流を測定することには慣れていても、電気容量を測定する機能は案外使ったことがないのではないだろうか。

2. 実験装置の概要

アルミ板2枚を平行平板コンデンサーの極板とし、その間に厚さの異なるテフロンシートを誘電体として挿入し、極板間の電気容量を、デジタルマルチメーター(DMM)を用いて測定する。

3. 実験に必要な環境と機器など

キットに入っているもの

- ・アルミニウム極板 A, B (1辺 20.0 cm の正方形, 厚さ 2.00 mm) 2 枚
- ・テフロンシート (厚さ 0.10 mm, 0.20 mm, 0.30 mm, 0.40 mm,) 4 枚
- ・A4厚紙 (厚さ 1 mm) 1 枚

必要な機器

- ・デジタルマルチメーター (DMM) MT-4510 など 1 台

静電容量を 0.01 nF まで測定可能であること。「相対値 (relative)」ボタンがあった方が良い。装置の電極にはミノムシクリップなどで接続する。

消耗品

- ・ペットボトル (2 L, 水入り)

4. 安全管理上の注意

アルミニウム極板の縁が鋭いため、手を切らないよう注意すること。

5. 解説と補足

【課題の解説】

極板間に厚さの異なるテフロンシートを誘電体として挿入し、それぞれの電気容量を測定する。また、得られた電気容量と平行平板コンデンサーの形状より、テフロンの比誘電率 ϵ_r を求める。

測定において注意すべき点は、テフロンシートの厚さを d としたとき、極板の間隔は d とはならないところにある。図2に示すように、テフロンシートと極板の間に間隔 d_f の空気層による隙間が必ず生じてしまうからである。

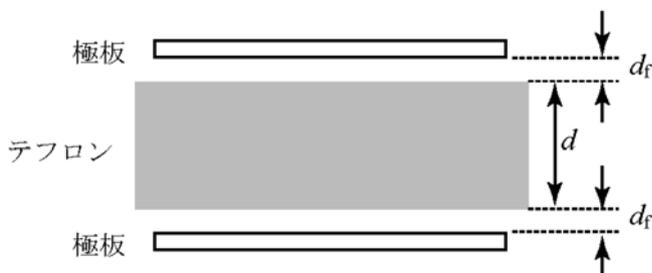


図2

したがって、図2のコンデンサーは、極板間隔が d で、媒質が比誘電率 ϵ_r のテフロンであるコンデンサー C_1 の両端に、極板間隔が d_f で、媒質が空気のコンデンサー C_2 が直列接続されたものと考えることができる。この課題では、図2を平行平板コンデンサーの実験モデルとする。空気の比誘電率はほぼ1なので、図2のコンデンサー全体の電気容量 C は

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{d}{\epsilon_r \epsilon_0 S} + \frac{2d_f}{\epsilon_0 S} \quad (2)$$

となる。

式(2)を用いて C の d 依存性を調べるためには、 d_f が常に一定である必要がある。 d_f は極板にかける圧力によって変化する。電気容量の測定に際し、極板にペットボトルを載せて、圧力が一定となるように条件をそろえなければならない。

【設定と測定準備】

- ①アルミニウム極板 A および B を平行平板コンデンサーとして用いる。各極板の銅箔テープはアルミ板と電氣的に導通している。アルミ板の縁は鋭いため、手を切らないよう注意すること。
- ②極板 A を、銅箔テープ側を下にして厚紙の上に置く(図3(a))。その上にテフロンシートを置き(図3(b))、さらにその上に極板 B を、銅箔テープ側を上にして重ねて置く(図3(c))。極板 A と極板 B が完全に重なり合うように注意する。
- ③極板 B の上にペットボトルを載せて加重する(図3(d))。
- ④極板 A、極板 B それぞれの銅箔テープに、デジタルマルチメーター(DMM)の赤・黒2つのテストリード(ミノムシクリップ)を取り付けると、2極間の電気容量を測定することができる(図3(d))。銅箔テープは切れやすいので注意すること。切れた場合は新たに銅箔テープを貼りなおす必要がある(アルミ板ははんだ付けができないので、導電性の粘着剤を塗布した銅箔テープを使用している)。



図3

【DMMによる測定手順】

以下は第2チャレンジで使用した Mother Tool MT-4510 についての説明である。

- ① DMM の赤・黒のテストリードのミノムシクリップをどこにもつながない状態で、ロータリースイッチを「電源 OFF」の位置から「静電容量」の位置まで回すと、表示器に数値が表示される(図 4(a))。
- ② DMM 右上の相対値ボタン(図 4(b) 右側黄)を押すと、表示器に 00.00 nF と表示される。00.00 nF が表示されないときは、表示されるまで相対値ボタンを何回か押す必要がある。この状態で赤・黒のテスト

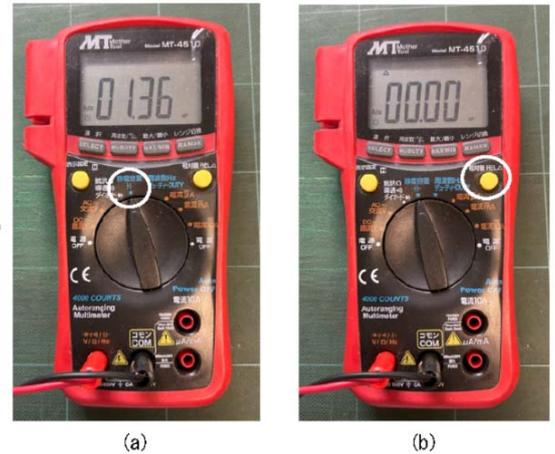


図 4

- リードのミノムシクリップを極板 A と極板 B につなぐと、AB 間の電気容量が表示される。
- ③ 測定のたびに、まず【設定と測定準備】④で取り付けしたミノムシクリップの一方を銅箔テープから外す。次に②の操作を行い、表示部が 00.00 nF になっていることを確認する。その後、再びミノムシクリップを極板に取り付けて測定を行うこと。

【各設問についての解説と補足】

問 1-1

厚さ d の異なるテフロンシート (0.10 mm, 0.20 mm, 0.30 mm, 0.40 mm) それぞれを極板間に挿入し、電気容量を測定しなさい。その測定結果から、表を完成させなさい。表示される値が時間変化する間は、一定値になるまで待ってから測定すること。

測定のたびに、【DMMによる測定手順】による②③の操作を遵守すること(*)。すべての測定を終えた後、DMM の切替スイッチを「OFF」の位置に戻しなさい。

コンデンサーに DMM を接続すると測定値がただちに表示されるが、その値は時間と共に次第に増加していき、安定した値が表示されるまでしばらく時間を要する。シートの厚さ d が小さいほど、安定するまでの時間が長くなる。これは極板への荷重によりコンデンサー内部の空気層から空気が抜け出ていく時間であり、そのあいだ次第に極板間隔が小さくなっていくので、測定値が増加していくと考えられる。 d が小さいほど、電気容量に対する空気層 d_f の影響が大きい。

(*)DMM の機種が異なる場合には、それぞれのマニュアルを参照のこと。

問 1-2

問 1-1 で作成した表から、縦軸に $1/C$ 、横軸に d を取ってプロットし、グラフを作成しなさい。

問 1-3

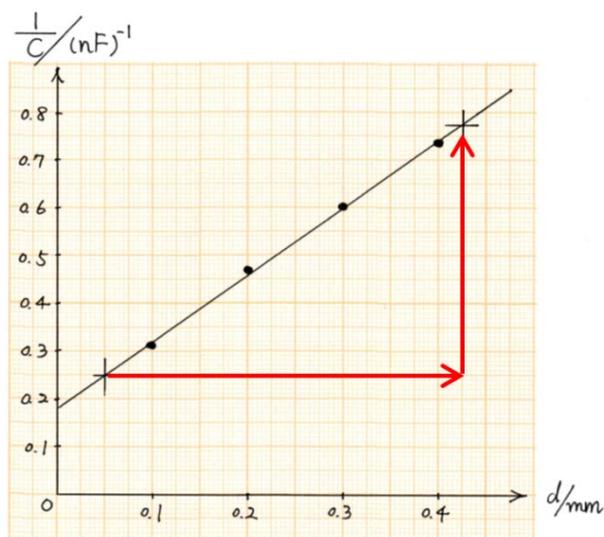
問 1-2 で作成したグラフより、テフロンの比誘電率 ϵ_r を求めなさい。計算式を書き、どのようにして求めたのかを説明しなさい。式の中の数値には、必要な場合には必ず単位を記入すること。

問 1-4

問 1-2 で作成したグラフより、 d_f を求めなさい。計算式を書き、どのようにして求めたのかを

説明しなさい。式の中の数値には、必要な場合には必ず単位を記入すること。

実験例



問 1-2 はグラフ表現，問 1-3 と問 1-4 はグラフから情報を読み取るスキルを問う設問となっている。問 1-2 のグラフ表現については

- ・ グラフ用紙全体を利用して描かれているか。
- ・ 目盛りが適切にスケーリングされているか。
- ・ 縦横の各軸に物理量とその単位が記されているか。
- ・ データは適切にプロットされているか。
- ・ プロットから適切に直線が描かれているか。

などの観点から評価できる。特に最後の点は重要である。本来この直線は最小二乗法で求めるべきものであるが、高校物理実験ではそうした解析ができないので、各プロットにできるだけ近くなるような 1 本の直線を引くというような指導がなされている。

問 1-3、問 1-4 はこうして描かれた直線の傾き k と y 切片から物理情報を引き出すスキルを問う設問である。傾き k は 4 個のデータから得られた直線の傾きであって、任意の異なる 2 つのプロット間の傾きではない。上の実験例では、直線上に選んだ 2 つの + 印間の傾き k を求めている。こうして求めた k は 4 個の実験データを反映したものになるが、2 つのプロット間であれば 2 個のデータのみを考慮し、他の 2 個のデータを無視したことになる。別紙の解答例にあるように、式(2)を参照すると、 k から $1/\epsilon_r \epsilon_0 S$ についての情報が得られ、 y 切片からは $2d_f/\epsilon_0 S$ が得られる。これに続く問題は単位変換である。グラフから求めた k や y 切片の単位と、 $1/\epsilon_r \epsilon_0 S$ 、 $2d_f/\epsilon_0 S$ の単位を一致させなければ両者を結びつけることはできない。解答例にはそうした過程が示されているが、問 1-3、問 1-4 の「計算式を書き、どのようにして求めたのかを説明しなさい」はこうした記述を要求するものである。

6. 課題の再構成, 短縮版作成へのヒント

問 1-1 から問 1-4 の各課題内容からわかるように, 課題 1 は実験実行によるデータの取得→データのグラフ表現→実験モデルに基づいたグラフ表現の解釈→物理情報の処理→目的とする物理量の取得, といった一連の流れを構成している。全体の構成を維持するのであれば, 短縮版は問 1-4 を削除することくらいであろうか。

7. 発展課題へのヒント

【同じ厚さの誘電体シートを重ねる】この課題のような, 平行平板コンデンサーの極板間に厚さの異なる誘電体(テフロン)シートを入れ替えて極板間距離 d を変える方法とは異なり, 厚さ D の誘電体シートを極板間に入れる際, その重ねる枚数を変えて d を変える方法も考えられる。図 5 はシートを 5 枚挿入した状態を表している。各シート間の空気層の厚さを d_s とする。通常 d_s はアルミ, テフロン間の空気層の厚さ d_f とは異なると考えられる。

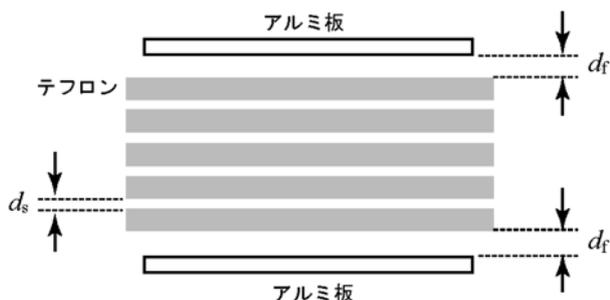


図 5

極板間に N 枚のシートを挿入したときの全体の電気容量を C とすれば, 先と同様にして

$$\frac{1}{C} = \frac{ND}{\epsilon_r \epsilon_0 S} + \frac{2d_f + (N-1)d_s}{\epsilon_0 S}$$

と表されることがわかる。これを整理すれば

$$\frac{1}{C} = \frac{ND}{\epsilon_{\text{eff}} \epsilon_0 S} + \frac{2d_f - d_s}{\epsilon_0 S}, \quad \epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r}{1 + \epsilon_r \frac{d_s}{D}}$$

である。枚数 N を変えながら電気容量を測定し, 縦軸に $1/C$, 横軸に N を取ってプロットし, グラフを作成すれば, 先と同様にしてその傾きや y 切片を読み取ることにより, 誘電体シートの誘電率 ϵ_r を求めることができそうに思える。しかし上の表式からわかるように, グラフの傾きからわかるのは ϵ_r ではなく ϵ_{eff} であり, また y 切片からわかるのは $2d_f - d_s$ である。テフロンのように, すでに誘電率が $\epsilon_r = 2.0$ とわかっているものであれば, 求めた ϵ_{eff} から d_s , そして y 切片から d_f を得ることができる。いずれの空気層の厚さも極板への加圧によって変化する。

【空気コンデンサー】アルミ板の端の方 3 ヶ所に適当な厚さの絶縁体をスペーサー(面積を無視できる程度の大きさ)として入れれば, 空気の誘電率を直接測定し, ϵ_0 を求めることも可能であろう。

8. その他

テフロンシートにしわが寄っていたりすると, 空気層が厚くなってしまう可能性がある。その場合は平らな板に挟んでしわを伸ばすと改善する。シートとして絶縁物なら何でも使えるが, 誘電率が同じで厚さがシリーズで揃えられるシートを入手するのは案外難しく, 今回はテフロンシートを使う事にした。

参考文献

- [1] T. T. Grove, M. F. Masters, and R. E. Miers, *Am. J. Phys.* 73(1), January 2005

2025年版実験キットのための実験指導の手引き (教員向け資料)

課題2 コンデンサと静電気

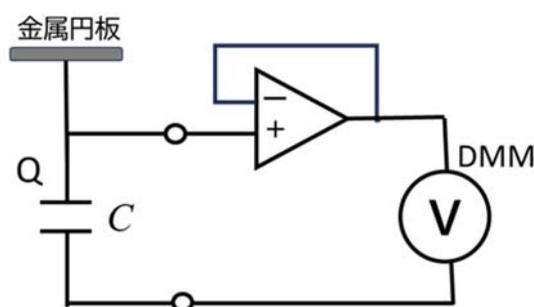
1. 課題作成の背景, ねらい

本キットは静電気の実験装置である。静電気の実験では古くから箔検電器が使われている。箔検電器は教育的に優れた実験装置であるが、定量的な測定器という観点からすると物足りないものがある。しかも原理についても通常言われている説明は不十分であることが指摘されている[1]。本装置では、金属箔の代わりにコンデンサを使い、コンデンサに溜まった電荷を電位計で測定することで定量的な測定が可能である。

[1] 小栗美香, et al. 箔検電器のコンデンサー構造と動作原理. 物理教育, 2019, 67.1: 2-9.

2. 実験装置の概要

図に示すように、実験装置は円板電極、コンデンサ、プリアンプ、テスターからなる。円板電極に静電気を近づけると逆符号の電荷が静電誘導されるため、同符号の電荷がコンデンサに蓄積するという構造で、蓄積した電荷量をコンデンサの両端電圧で測るという仕組みである。ポイントはコンデンサに蓄積された電荷を逃さないまま測定することにある。例えば、入力抵抗が $10\text{M}\Omega$ のテスターではほぼ一瞬で放電してしまうために測定できない。そこで入力抵抗が $1\text{T}\Omega$ (テラオーム) 以上のプリアンプを間に入れてある。円板電極、コンデンサ、プリアンプはアルミケースの中にあり、円板電極の箇所には穴が開けられている。コンデンサ C は 1nF (精度 1%) としている。この装置を使っているいろいろな実験が考えられるが、物理チャレンジでは 3 つの実験を出題した。



3. 実験に必要な環境と機器など

キットに入っているもの

- ・電位計用プリアンプ (穴の空いたアルミケース)
付属品: 基準電圧源 (小型基板)、電位計のふた (円形ステンレス板)
グラウンド G 端子台 (銅線のリング)、プローブ、クリップ付リード線
- ・静電気を作るための道具: 塩ビ板、ウール布切れ

必要な機器

- ・デジタルテスター (直流電圧計として使用する。測定レンジ: $\pm 10\text{V}$)
装置の電極にはミノムシクリップなどで接続する。

消耗品

- ・ 9 V 角形乾電池 1 個、 単三乾電池 1.5 V 4 個

4. 安全管理上の注意

高電圧を扱う場合は、感電に注意が必要である。

5. 解説と補足

実験装置について

プリアンプは CMOS オペアンプ (LMC662AIN(Texas Instruments)) を使った電圧フォロアである。2 回路構成の IC であるが、その片方だけを使用している。未使用の一方も、下図のように、予備用として同じ構成になっているので、故障したときはこれを使うことができる (金属円板の付け替え (はんだ付け) が必要。出力は青のリード線)。規格表によれば、LMC662AIN の入力バイアス電流は $2\text{ fA}(\text{typ.})$ 、入力抵抗 $>1\text{ T}\Omega$ となっており、入力抵抗が非常に高く、電圧増幅率が 1 倍のアンプとして働く。実測によれば入力容量は約 5 pF である。表面伝導による漏れ電流の影響を減らすために入力端子はガードリングで囲ってある。コンデンサ C は 1 nF (C322C102F1G5TA、KEMET、精度 1%) である。

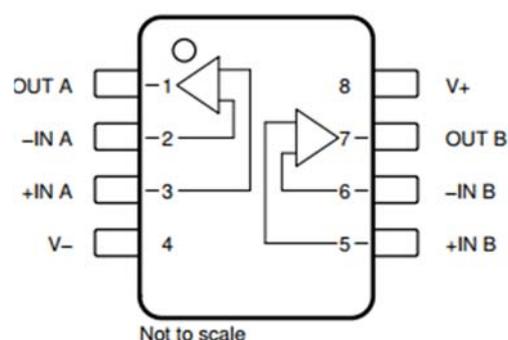
供給電圧は最大 16 V である。電池の個数を減らすため、少々異例だが $+9\text{ V}$ (006P 角形電池) と -6 V (1.5 V 乾電池 $\times 4$) にしてある。これにより動作電圧範囲は $-5.8\text{ V}\sim 7.1\text{ V}$ である。動作電圧を大きく超える電圧を加えるとリーク電流が大きくなり、最悪動作しなくなる。新品の乾電池を使うと総電圧が 16 V を超えることがあるが、経験的に問題はない。

各部のグラウンド G を同電位にすることが必須である。銅線の輪にクリップでつなぐことでこれを実現する。DC 測定のため、銅線をアースする必要はないと考えている。

LMC66x CMOS デュアル オペアンプ

特長

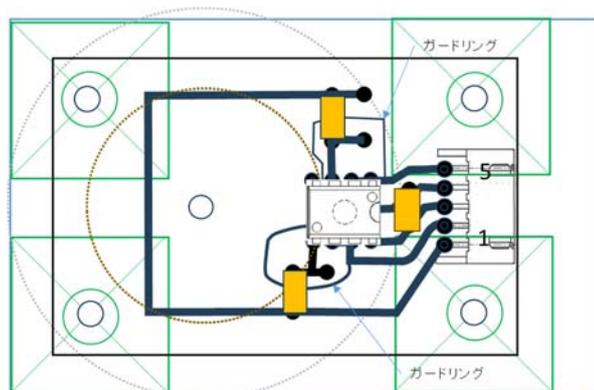
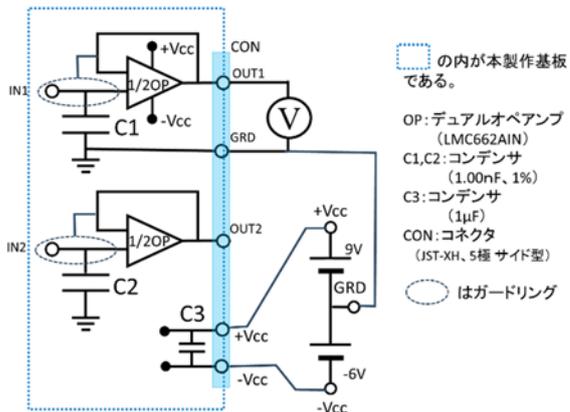
- ・ レール ツー レールの出力スイング
- ・ 高い電圧ゲイン: 126 dB
- ・ 低い入力オフセット電圧: 3 mV
- ・ 低いオフセット電圧ドリフト: $1.3\text{ }\mu\text{V}/^\circ\text{ C}$
- ・ きわめて低い入力バイアス電流: 2 fA
- ・ 低い電圧ノイズ: $22\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
- ・ $4.75\text{ V}\sim 15.5\text{ V}$ の動作範囲
- ・ $\text{ISS} = 400\text{ }\mu\text{A}/\text{アンプ}$ 、 V+ に非依存
- ・ スルーレート: $1.1\text{ V}/\mu\text{s}$



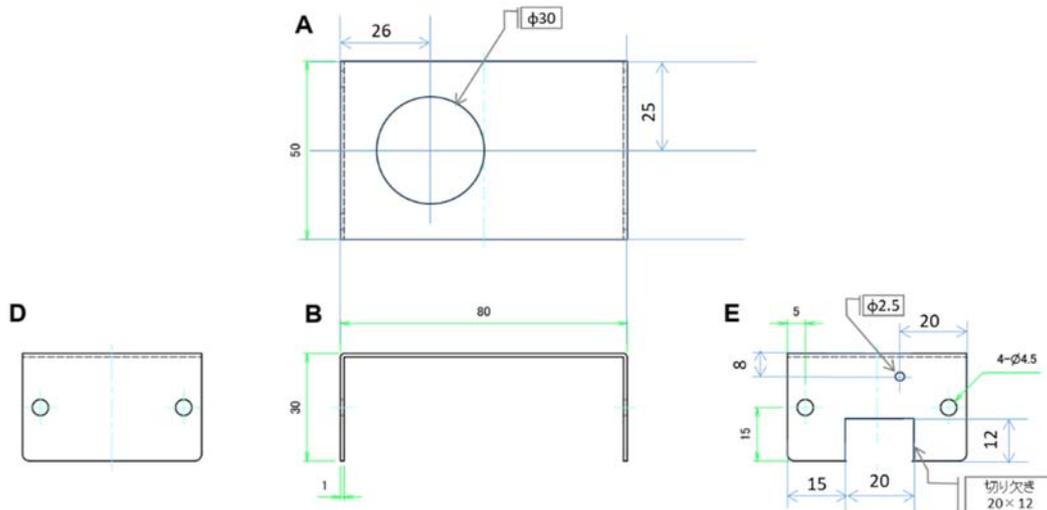
プリアンプ

回路図

物理実験用基板



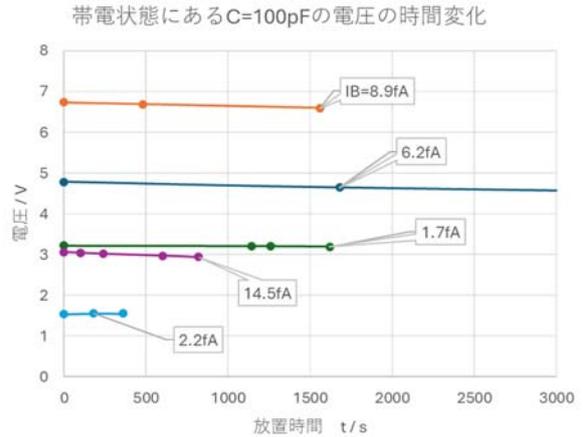
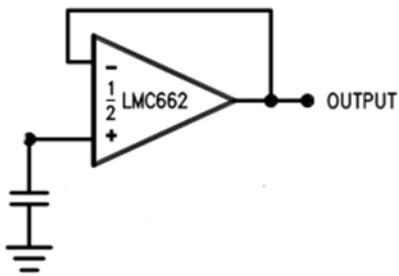
アルミケース (Takachi, YM-8-3-5 を追加工)



IC 単体の漏れ電流 (バイアス電流) の確認

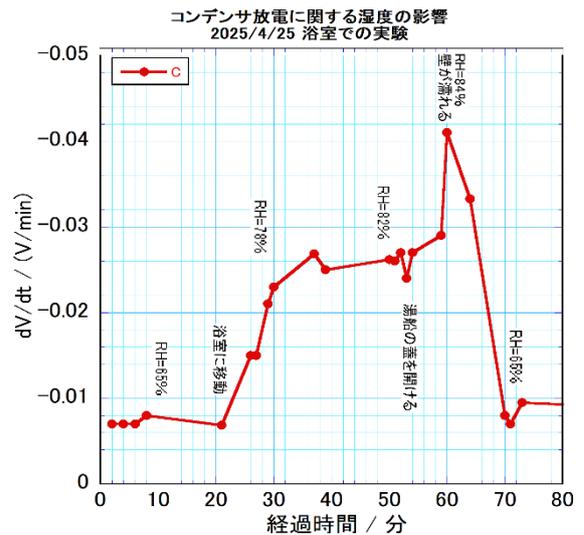
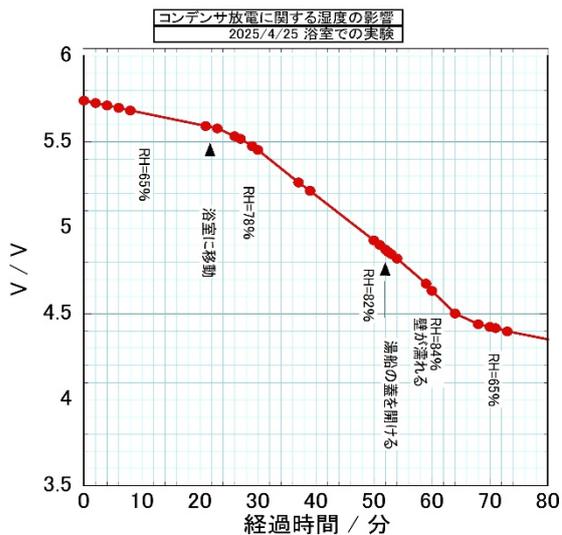
$C=100\text{ pF}$ としてコンデンサを充電した後、出力電圧の時間変化を測った (下左図、結果は下右図)。

漏れ電流 (バイアス電流) は $2\sim 15\text{ fA}$ ($10^4\sim 10^5$ 電子/s) になった。なお、 15 fA 以外の測定は乾いたコピー用紙上で測定した。コンデンサに息を吹きかけると漏れ電流が一時的に増える。



実機によるドリフトの確認

第2チャレンジの開催は8月であり高温高湿度での電流リークが心配されたため、浴室内で漏れ電流を評価した。結果：漏れ電流は居間で100 fA、浴室で約500 fA。IC単体よりリーク電流は10倍以上大きく、浴室ではさらに増えるが、測定時間を1分と考えると決定的な影響はないと判断した。



各課題についての補足

チェック課題 A~C

装置の動作確認を行うためのチェックである。

チェック A：下限以下の場合、配線と電池を調べ、必要に応じて取り替える。新品の乾電池の場合上限電圧を超えることもあるが、OKにしても問題ない。

チェック B、C：電圧変化が大きい場合、・エアコンの風がないところに移動する、・回路の入力端子周辺をアルコールで拭き完全に乾かす。

コンデンサを充電したり放電したりするのにプローブ A を使用しているが、このプローブには瞬時に大きな電流が流れるのを避けるために、100 kΩ の抵抗が付属している。

表5.1-1 物質の帯電列の例（出典；MIL-HDBK-263A）

極性	物質名
+	人間の手
	ウサギの皮
	ガラス
	マイカ
	人間の頭髪
	ナイロン
	羊皮
	毛皮
	鉛
	絹
	アルミニウム
	紙
	木綿
	銅
	木材
	コハク
	シーリングワックス
硬質ゴム	
-	ニッケル、銅
	金、プラチナ
	硫黄
	アセテート、レーヨン
	ポリエステル
	セルロイド
	オルロン
	ポリウレタン
	ポリエチレン
	ポリプロピレン
	ポリ塩化ビニール
	K E I、ふっ素
	シリコン
テフロン	

【課題 2-1：摩擦帯電現象】

摩擦電気を題材にしている、箔検電器でもできる実験であるが、この電位計を使えば電荷の符号が直接分かる。

摩擦帯電については右の表（静電気対策ハンドブック、JAXA から引用）が知られている。この順番を決めることもおもしろい課題である。

【課題 2-2：ふた F の効果】

金属板による静電場の遮蔽効果を試す問題である。接地されているか否かで結果が大きく異なることに気づいてほしい。

【実験 2-3：円板電極 P とふた F の間の静電容量】

ふたの効果を実列につないだコンデンサでモデル化して理解する。

【実験 2-4：静電気の電位】

静電気が物を引き寄せるとか火花を出して放電することは知っているが、それが一体どれくらいの電圧なのか定量的に知る機会はありません。数 V の電位を測定する装置を使って摩擦電気の kV 単位の電圧を推定できる点に感動してもらえるのではないかと期待している。

実験課題の実行における注意点

塩ビ板が手の汗で濡れてしまったために摩擦電気が全く起こせなくなった例があった。夏場には特に注意が必要であろう。漏れ電流が大きくなったときは、洗剤やアルコールで洗い、すすぎ、完全に乾燥すればもとに戻る。

6. 課題の再構成、短縮版作成へのヒント

この課題には文章で説明させる部分が多いので、答案作成にはそれなりに時間がかかるが、実験の作業量はそれほど多くないので、全部実行したとしてもそれほど時間はかからないと思われる。箔検電器の代わりとして電位計を使った演示実験も面白いかもしれない。

7. 発展課題へのヒント

電位計は超高入力抵抗のバッファアンプであり、いろいろな実験への応用が考えられる。以下にいくつか例示する。いずれも作問の過程で検討した実験である。

なお、静電気を使った静電誘導の実験では簡単な解釈ができない現象も時折観察される。おそらく高電圧による空気放電が関係しているのではないかと考えているが、深く追求したことはない。そのような現象が見えたときは解明することを期待する。

追加の測定器：必須ではないが、可変の直流電圧源があるとよい。

(1) 電荷移動法による C の決定

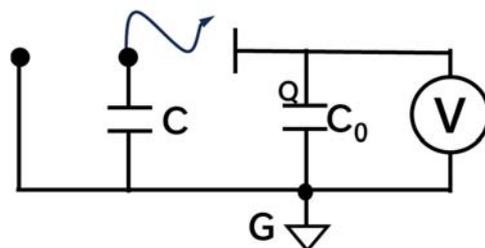
充電されたコンデンサと空のコンデンサをつなげる前後の電圧変化から 2 つのコンデンサの静電容量の比を決定する。一方を静電容量が既知の標準コンデンサとすれば、他方の静電容量を決めることができる。

実験例（放電過程）

- ① 円板電極を電圧源 V_0 につなげ、内部コンデンサ C_0 を充電する。
- ② 未知のコンデンサ C の一端を G 、他端も G につなげ放電する。
- ③ C の片側端子を G から切り離し、円板電極につなぐ。
- ④ これを繰り返す。

※ つなぐ時間は 1 秒間で十分である。

※ コンデンサの G 側でない端子や円板電極には手で触らない。



逆に充電過程の実験もできる。

- ① 円板電極を G につなげ、 C_0 を放電する。
- ② 未知のコンデンサ C の一端を G 、他端を電圧源 V_1 につなげ充電する。
- ③ C の端子を電圧源から切り離し、円板電極につなぐ。
- ④ これを繰り返す。

原理

C_0 のコンデンサとグラウンド G あるいは電圧源の間にコンデンサを介して電荷を運ぶ。

放電過程： V_0 に充電された C_0 に空 ($V=0$) の C をつなげる場合

$$V_n = \{C_0 / (C_0 + C)\}^n \times V_0$$

充電過程： 空の C_0 に V_1 に充電された C をつなげる場合

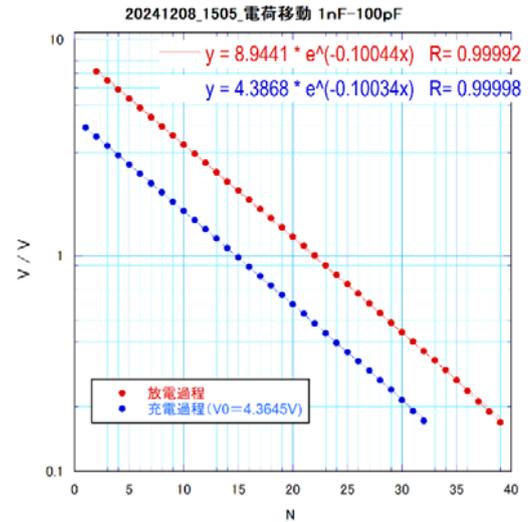
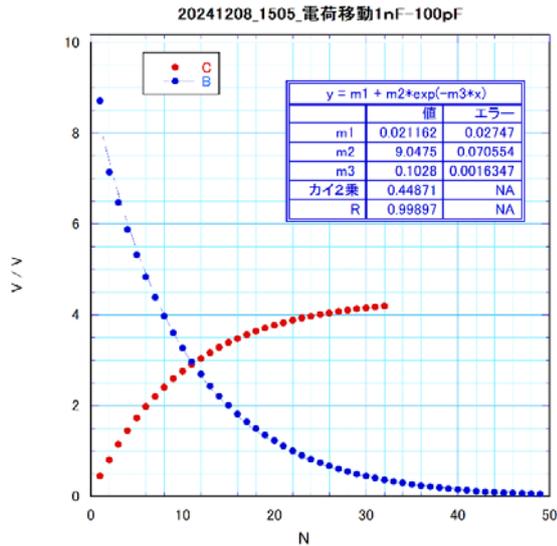
$$V_n = [1 - \{C_0 / (C_0 + C)\}^n] \times V_1 \Rightarrow V_1 - V_n = \{C_0 / (C_0 + C)\}^n \times V_1$$

(注意) 内部コンデンサの静電容量 C_0 にはプリアンプの入力静電容量 (約 5 pF) を加える必要がある。

※ C あるいは C_0 を決めるだけであれば、1 回 ($n=1$) でよい。

測定例： $C_0 = 1$ nF、 $C = 100$ pF とした実験結果

$$\exp(C_0 / (C_0 + C)) = -0.10044 \Rightarrow C / C_0 = 0.1057$$



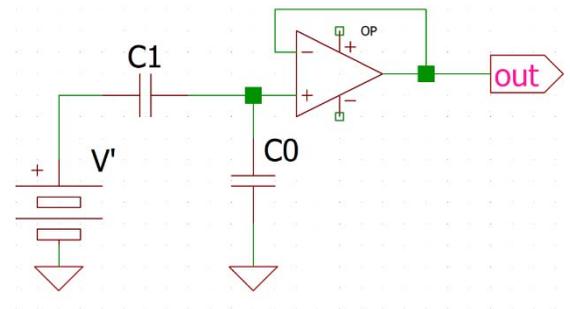
(2) 電圧印加法による C、V、Q の決定、

実験 2-3, 2-4 の方法を応用すれば、小さな C の測定、高電圧の測定、荷電量の定量ができる。

実験例

- ① 未知の C_1 を通して円板電極と電圧源をつなげる。
- ② 電圧源は 0V のまま、円板電極を G につなげ C_0 、C を放電する。
- ③ 電圧源の電圧 V' を変え、テスタの変化を調べる。

※ V' を大きくすれば、小さい C も測れる。
 ただし、高電圧は危険であることを注意すること。
 またコンデンサの耐電圧にも注意が必要である。



応用

既知の C_1 を使えば電圧源の電圧、あるいは C_1 に溜まっている電荷がわかる。

(3) 平行平板コンデンサの静電容量測定

(1)電荷移動法あるいは(2)電圧印加法による C の決定を使って、平行平板コンデンサの式

$$C = \epsilon S / d$$

の d -依存性、 S -依存性の確認をする。または誘電率を決定する。例えば、課題 1 もこの電位計を使って測定できる。

ヒント

- ・小さい C は電圧印加法を使う
- ・計算によれば、 $S=10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 、 $d=5\text{ mm}$ で $C=18\text{ pF}$ であり、gap は mm オーダーでよい。

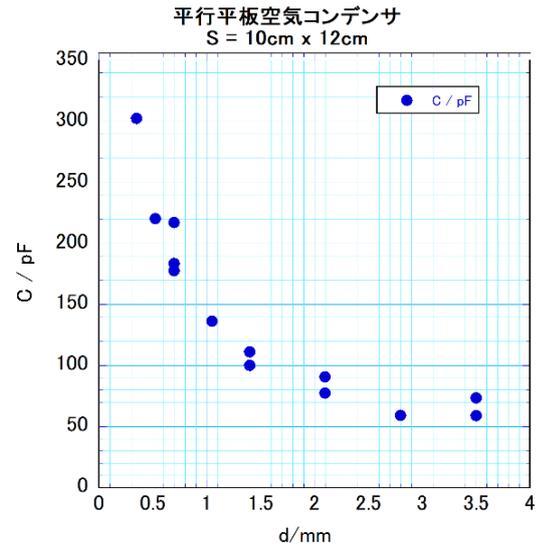
・間隔（ギャップ） d が小さい場合は、電極の平面性・平行性の実現が難しいが、mm 以上であればある程度保持できる。

・誘電層として空気を使えば、真空の透磁率 ϵ_0 を実験的に決めることができる。（※基準コンデンサの値を仮定しているため、正確に言うと、「実験で決定した」ということは実は正しくない。）

・ d が大きい場合、誘電体挿入実験（電極は変えないままギャップに誘電体を入れて容量の変化を見る）もできそうである。

注意

・漏れ電流の大きなコンデンサは測定できない。



(4) 同軸ケーブルの静電容量（任意形状の導体間の静電容量の測定）

実験 2-3 で蓋と円板電極の静電容量を求めたが、この 2 つは平行平板コンデンサという基準から見ると少し外れている。実は平行平板に限らず、任意の導体の間には静電誘導があることを認識することと、その現象を静電容量 C という量で表せることの理解は重要であり、その実験も可能である。

同軸ケーブルは内部導体（芯線）の周りを絶縁体が覆い、さらにその周囲を外部導体が覆う構造をしている。内部導体と外部導体の間に電位差 V があると電荷 $+Q$ 、 $-Q$ がたまり、その係数が静電容量 C である： $Q = CV$ 。同軸ケーブルには主に 2 種類あり、50 Ω 系は 100 pF/m、75 Ω 系は 67 pF/m の C を持っている。

実験例

長さ 1m の同軸ケーブルの外部導体を G につなぎ、中心導体を電池に一瞬触った後円板導体につなぎ、前後のテスターの変化を記録する。

同軸ケーブルの静電容量： $C = 2\pi\epsilon L / \ln(b/a)$

（ここで、 L :ケーブルの長さ、 a :内部導体の外径、 b :外部導体の内径、 \ln :自然対数）

(5) 超高抵抗の測定

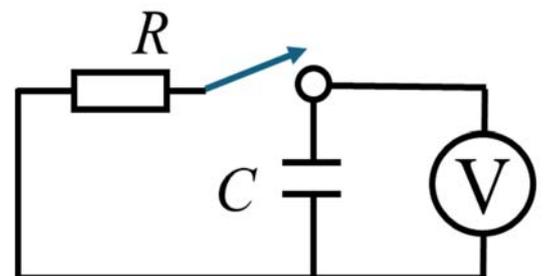
通常のテスターで測れる抵抗値は 0.1 Ω ~ 10 M Ω 程度である。この電位計の入力抵抗は 1T Ω 以上であるので、工夫によって超高抵抗の値を測ることが可能である。

実験例： R を介した C_0 の充放電過程の観察から、高抵抗、絶縁体の抵抗値を決定する。

- ① 電位計の C_0 を充電する。
- ② 高抵抗 R の一端を G につなぎ、他端を Δt 秒だけ円板電極にふれる。
- ③ 触れる前後のテスターの値を記録する。

電圧変化が小さい場合、触れている間 R には $I = V/R$ の電

流が流れるため、 Δt 秒間には $\Delta Q = I \Delta t$ の電荷が放電される。その結果、 C の両端電圧は $\Delta V =$



$\Delta Q / C = V \Delta t / CR$ だけ減少する。したがって、 $R = V \Delta t / C \Delta V$ 。

電位計の漏れ電流は 100 fA 程度であるため、これ以下の電流は区別が困難であるが、例えば $V/R = 1000$ fA、 $V = 1$ V としても $R = 10^{12} \Omega = 1$ T Ω の測定は可能である。

逆に放電が早すぎる場合は、円板電極と G の間に大きなコンデンサをつなぐと C が並列容量になるため電圧変化は小さくなる。

例：“絶縁体”の抵抗

ゴム手袋の絶縁性の違い：天然ゴム、ニトリルゴム

(6) 等電荷過程の実験： Q ＝一定の下で d や S を変えた場合の電圧変化

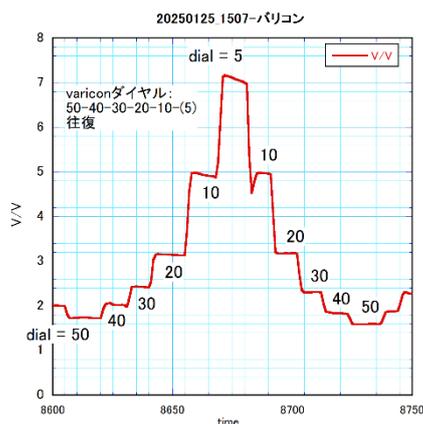
2つの導体を電氣的に孤立したまま、動かすとどうなるか？

例えば、平行平板コンデンサを充電した後、ギャップ間隔を広げる。このときの両電極間の電圧を考えると、電荷は保存するため

$$Q = CV = C'V' \therefore V' = (C/C')V = (d'/d)V$$

となる。 $d = 10$ μm を 1 mm に広げると電圧は 100 倍になる？

例：可変コンデンサ（バリコン）を使った実験



(7) 静電遮蔽の実験

問 2-2 で確認したようにグラウンドにつながれた導体で囲むことは静電誘導を抑える有効な手段である。3 個以上の導体がある場合の 2 個の導体間の見かけの容量は残りの導体の状態によって変わること、それをどう理解し整理するかという問題に発展できる。電気力線の様子との関係も面白い問題だと思われる。

電位計はアルミケースに入っているが、これをケースから出すと外界の影響を直接受けることになる。まずゆらぎが各段に増えるが、その理由はなぜか？装置の近くに手を伸ばすとどうなるか？G につなげたコードを手でもって同じことをすればどうなるか？等々考える対象はいろいろある。

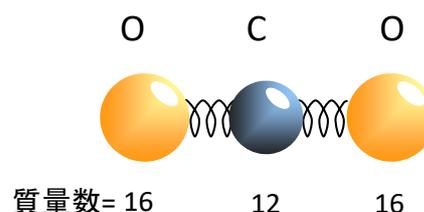
2025年版実験キットのための実験指導の手引き (教員向け資料)

課題3：分子振動

1. 課題作成の背景, ねらい

原子分子の物理は高校生には難しいとされてきたが、おもりとばねで構成された分子の模型(分子模型)を使えば高校生にも馴染みのある力学的振動として実験, 解析できると考えた。従来の振動の実験では観測しやすいように振動周期が長い系が選ばれてきたが, 装置が大きくなるのが難点であった。本課題ではおもりの位置検出方法を工夫し, オシロスコープを使って目視では観測できない短い周期の振動を対象とした。分子振動の振動数は 10^{13} Hz以上であり, 普通の方法では観測できないが, 振り子等のHzオーダーの振動や分子模型の数10~100 Hzの振動も同じ物理で記述できることを知ってもらいたい。実験のテーマは, ①共鳴付近での振幅の振舞い(課題3-3a,b,d), ②共鳴付近での位相の変化(課題3-3c,e,g,k,l) ③各おもりの変位の仕方(課題3-4, 3-5, 3-6)の3つで構成されるが, 実験の手順は①と②が同時進行するかたちになっている。

大気中のCO₂分子は, 地表から宇宙へ放出される赤外線の一部を吸収してその分子振動が励起され, その後, 全方向に赤外線を再放出するので約半分は地上に戻されることになり地球温暖化をもたらす。そのため, 温室効果ガスの一種とされている。本課題では, CO₂分子(図A)の分子振動を調べるため, 3つのおもりの質量の大小関係を似せた分子模型を使った。分子模型は3つの固有振動をもち, 周期的外力を加えると, その振動数が固有振動数に近いとその固有振動は強く励起される。これを共振現象と呼び, 固有振動と共振現象の性質を実験, 解析する。

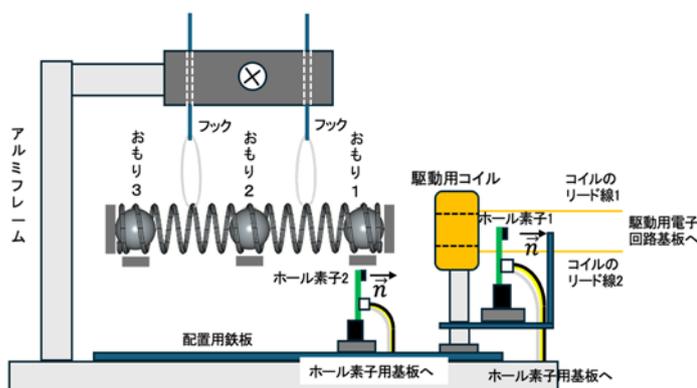


図A CO₂分子

2. 実験装置の概要

パーツを並べ替えていくつかの実験を行うが, その中の一つ, 分子軸方向の振動を調べる実験配置図を図Aに示す。この他に, 駆動用電子回路基板, ホール素子用基板, オシロスコープ, デジタルマルチメーター(DMM), 電池ボックス(単三3本用と単三2本用)を使い, 配線や使用法は問題冊子にある。

分子模型はコイルばねと3個のおもりで構成されている。おもり1の右側とおもり3の左側には駆動用磁石が取り付けられており、駆動用コイルに近い磁石がコイルで発生した交流磁場から力を受ける。ホール素子1はコイルで発生した磁場を検出する。すべてのおもりの下側には位置検出用の磁石が取り付けられており、ホール素子2でおもりのホール素子の向き \vec{n} 方向の変位を検出する。その原理は問題冊子<おもりの振動変位の検出>にある。



図A 分子軸方向の振動を調べる実験配置。

おもり1とおもり3は駆動用磁石と位置検出用磁石とともに運動するが、おもり2は位置検出用磁石だけと運動するので実効的質量は小さく、質量の大小関係は $O=C=O$ 分子と同じになる。このような分子模型は分子軸方向に対称伸縮振動と反対称伸縮振動、分子軸に直交する方向に変角振動と呼ばれる固有振動をもつ。交流磁場の周波数と分子模型の固有振動数が一致すると共振現象のため固有振動が大きく励起される。コイルに印加する交流電流の周波数を変えながらおもりの変位を観測して、固有振動の周波数、変位振幅の周波数依存性、固有振動の駆動磁場とおもりの変位の位相関係、各固有振動の各おもりの変位のしかたを調べる。その結果から共振現象を理解、実感し、温室効果ガスと分子振動の関係を考察することが課題の目標である。

3. 実験に必要な環境と機器など

実験に使う机は奥行き 45 cm 以上、幅 90 cm 以上あったほうがよい。デジタルマルチメーター (DMM) はキットに含まれていないので別途用意する必要がある。使用するのは周波数測定機能だけである。装置の端子にはミノムシクリップなどで接続する。単三の乾電池を 5 本使用する。

オシロスコープは 2 入力電圧を表示可能でトリガー機能があれば良く、アクセサリーのプローブ 2 本を使う。プローブがない場合はミノムシクリップつき同軸ケーブルなどで接続しても良い。感度や周波数帯域は廉価機種でも問題になることはない。デジタル式オシロスコープにある画面の保存機能があれば便利だが必須ではない。

使用する部品の詳細は問題冊子の 10~11, 27 ページに掲載されている。

4. 安全管理上の注意

駆動用磁石、位置検出用磁石、駆動用コイルのマウント用磁石、ホール素子のマウント用磁石は強力なので指などを挟まれないように注意する。コイルには比較的大きな電流が流れるがコイルが熱くなることはない。アルカリ電池を使えばショートしても危険なレベルにはならない。駆動用コイルと駆動用磁石が近すぎると、共振時の対称伸縮振動では激しく分子模型が振動してコイルとぶつかったり、吊り糸が外れたりするかもしれない。しかし、安全面で問題になるレベルではない。それでも、駆動用コイルと駆動用磁石の距離はある程度離しておくが良い。

5. 解説と補足

問題冊子に従えば実験は正しく実行できるはずであるが、勘所、陥りやすい失敗について問題ごとに示す。また、根拠の説明を省略した部分もあるので補足を記す。

問 3-2 対称伸縮振動の固有周波数の粗い探索

分子模型を吊る吊りひもがねじれていると固有振動以外の振動が観測されやすくよくない。

共振の半値半幅は約 0.3 Hz と非常に狭いため、駆動周波数を変えても振動の振幅がその周波数での値に達するまでに $(\pi 0.3 \text{ Hz})^{-1} \sim 1 \text{ s}$ の 5 倍程度の時間がかかる。このため駆動周波数を速く変えると振幅の増減を見落とす。また、駆動周波数を変えて変化をする以下の測定でも定常状態に達するまで待つ。

問 3-3a 対称伸縮振動の共振曲線 振幅がピークになる周波数

ホール素子からの信号は位置検出用磁石とホール素子との距離に強く依存するのでホール素子を置く位置だけでなく、吊りひもを吊るフックの高さも調整する（竹串をゲージとして利用）。

駆動用コイルと駆動用磁石が近すぎると余分な振動が励起され、対称伸縮振動だけを観測できない。

ここでは、共鳴のおよその周波数を知ることが目的なので、振幅のピーク時の駆動周波数を決めるためにあまり時間をかけなくて良い。

問 3-3b 対称伸縮振動の共振曲線を求めるための最初のステップとして、共鳴条件における振幅を求める。

問 3-3c 駆動力とおもりの変位の時間差を振幅がピークになる周波数において観測する。

問 3-3d, e, f, g 共鳴より上の周波数と下の周波数（それぞれ振幅がピークの約半分になる周波数）で駆動力とおもりの変位の時間差がどのように変化するかを観測する。同時に共振曲線を描くために振幅の周波数依存性も記録する。

問 3-3i, j 対称伸縮振動の共振曲線を描き、振幅がピークの半分になる周波数を決める。その値は問 3-3d で設定した f_{-half} や f_{+half} とは必ずしも一致しないが気にしなくてよい。この結果から共振の鋭さの指標となる半値幅が求められる。なお解答例にあるように共振曲線は共振周波数の前後で対称にはならない。

問 3-3k, 1 駆動力とおもりの変位の時間差から効率よく分子模型にエネルギーが入る条件を考える。

問題冊子にあるように、コイルから分子模型に入る仕事ではなく、仕事率を考える。仕事は仕事率の時間積分。

問 3-4a, b, c, d 対称伸縮振動のおもりの変位

駆動信号と変位の時間差に注目する。変位の大きさを議論するにはキャリブレーションが必要になる。(7. 発展課題へのヒントを参照。)

問 3-5a 反対称伸縮振動の共振周波数

反対称伸縮振動は励起されにくいので駆動コイルと駆動用磁石の距離を近づける。

問 3-5b, c, d 反対称伸縮振動のおもりの変位

問 3-4a, b, c, d と同様な注意

問 3-6a, b 変角振動の共振周波数

変角振動は励起されやすいので駆動コイルと駆動用磁石の距離を適切に離す。

問 3-6c 変角振動のおもりの変位

問 3-4a, b, c, d と同様な注意

問 3-7 赤外線による CO₂ 分子の振動励起

駆動用コイルは主に駆動用磁石に力を及ぼすが、赤外線は分子全体に空間的に一様な電場を与える。(時間的には高速で変化している。) 問題冊子にあるように、分子内での電荷分布と各固有振動の変位の仕方から励起されるかどうか考察する。分子の向きと赤外線の電場の向き(偏光方向)も励起できるかどうかに関係するが、ここでは励起できる向きの組み合わせがあるか否かを尋ねている。

【解説 1：地球温暖化現象と二酸化炭素】

問題冊子では赤外線、CO₂ 分子、地球温暖化現象の関係をごく簡単に説明している。少し詳しい説明が

物理チャレンジ 2025 第 2 チャレンジ実験問題解答例

補遺 【配布資料 1】 地球温暖化現象と二酸化炭素

にある。

【解説 2：ばねの曲げ(たわみ)に対するばね定数の導出】

問題冊子では、おもりの実効質量、ばねの伸びのばね定数、ばねの曲げのばね定数を与えて、分子模型の固有振動数を計算している。しかし、伸びのばね定数と曲げのばね定数の間にはばねの材質の弾性定数と形状で決まる関係がある。コイルばねをパイプとして導いた関係が

物理チャレンジ 2025 第 2 チャレンジ実験問題解答例

補遺 【配布資料 2】 ばねの曲げ(たわみ)に対するばね定数の導出

にある。

【解説3：質点系の運動】

問題冊子では、分子模型が対称伸縮振動、反対称伸縮振動、変角振動の固有振動を持つことを天下一りで与えているが、質点系の運動の自由度、振動運動の自由度、固有振動の性質の説明が

物理チャレンジ 2025 第2チャレンジ実験問題解答例

補遺 【配布資料3】 質点系の運動

にある。

【解説4：分子模型の固有振動数】

問題冊子では分子模型の固有振動である対称伸縮振動、反対称伸縮振動、変角振動の固有周波数を天下一りで与えている。導出の説明は

物理チャレンジ 2025 第2チャレンジ実験問題解答例

補遺 【配布資料4】 CO₂分子模型の固有振動数の導出

にある。まず、各おもりの加速度に関する運動方程式を連立する。これから導かれる永年方程式の固有値を求めるのが一般的だが、ここでは、分子模型の対称性を利用した物理的機知に富んだ方法を示している。各固有振動での各おもりの変位も導かれている。

【解説5：Hall素子を用いた磁束密度計の原理】

Hall素子の詳細は

物理チャレンジ 2025 第2チャレンジ実験問題解答例

補遺 【配布資料5】 Hall素子を用いた磁束密度計の原理

にある。実験ではHall素子の向きが重要だが、その理由が理解できる。

6. 課題の再構成、短縮版作成へのヒント

かなりボリュームがある課題なので、1. で述べた①共鳴付近での振幅の振舞い、②共鳴付近での位相の変化、③各おもりの変位の仕方のうちから1, 2題を選んでもよいだろう。特に難易度が高い駆動力とおもりの変位の時間差の測定と考察(②)を省くのがよいかもしれない。また、実験配置が異なる変角モードを省略してもよい。試験時間の制約を考慮して①と②のデータを同時進行で取得する構成にしてあるが、論理的には2つの内容を分離して実行させる方が分かりやすい。

さらに簡略化してホール素子、ホール素子用基板、オシロスコープを使わずに目視だけで振動を観測するのも選択肢の一つである。対称伸縮振動と変角振動の共振は容易に観測でき、反対称伸縮振動もコイルと駆動用磁石の距離を縮め、分子模型を吊っている吊り糸を注意深く観察すれば共振を観察できる。これで共振周波数は決められる。しかし、共振曲線、駆動力とおもりの変位の時間差などの定量的な測定はできない。

変角振動と対称伸縮振動との共振周波数はそれぞれ約30 Hzと約60 Hzで目視ではおもりの位置はわからない。しかし、これらが偶然スマホのビデオレート30 Hzとほぼ同じ、および、ほぼ2倍で、スマホのカメラで見るとゆっくり振動して見える。これで各おもりが相対的にどのように振動しているかわかる。変角振動をスマホで撮影した動画がYouTube：【物理チャレンジ

2025 実験問題コンテスト】コンデンサー，コンデンサーと静電気，分子振動【実験問題紹介】で公開されている。

7. 発展課題へのヒント

問題冊子では固有振動でのおもりの変位をおもり毎に調べる。しかし，2つのおもりの変位を同時に観測すれば相対的変位を直接見ることができる。例えば，コイルの磁場を観測していたホール素子1をおもり1の下に，ホール素子2をおもり3の下に置く。駆動用電子回路の周波数モニター用のFREQ端子の信号を別のケーブルを用意してオシロスコープのEXT端子に入力する。EXT端子の信号をトリガーにしてCH1とCH2を観測するとおもり1とおもり2が逆向きに振動していることがわかりやすい。

部活などでの発展課題として；Hall素子を2つともおもりの変位検出に用いると，各おもりの振幅の比を定量化できる。ただし，Hall素子からの信号強度は位置検出用磁石とHall素子の距離により敏感に変化するので，Hall素子からの信号強度と実際の変位量の関係をあらかじめキャリブレーションしておく必要がある。指で分子模型の一端を押して分子模型全体をブランコのように振動させると各おもりは同振幅，同位相で変位するので，2個のHall素子からの信号を同時にオシロスコープに表示させればキャリブレーションができる。反対称伸縮振動や変角振動で駆動力とおもりの変位の時間差を調べてみるのも面白いだろう。

二原子分子の分子模型なら固有振動でのおもりの変位もその周波数も高校生にも容易に理解できる。最も簡単なのは N_2 のような等核二原子分子で，固有振動数もすぐに計算できる。本装置のおもりは直径10mmの鉛玉で，同じサイズの真鍮やジュラルミンの球は容易に入手できる。これらを組み合わせて異核二原子分子の分子模型を作り，固有振動数の質量依存性を調べることができる。2つの質量の効果は，総質量ではなく換算質量で効き，軽い方が支配的になることを実感できるだろう。

バネ：サミニ株式会社 圧縮スプリング No. 12-1226

鉛玉：ブランド名「光」GZ95 ϕ 10 mm

8. その他

回路基板の入出力端子からコードが外れた場合は，止ネジを十分に緩めてから銅線を奥まで差し込んで締め直す。このとき深く入れすぎるとビニール被覆を押しやることになり，導通しない。また抜けやすい時にはネジの直下に銅線が来るように注意してネジを締めること。