

物理チャレンジ 2025
実験問題
2025 年 8 月 22 日（金）

試験時間	13 : 20 ～ 18 : 20
実験器具後片付け	18 : 20 ～ 18 : 40

実験問題にチャレンジを始める前に下記の＜注意事項＞をよく読むこと。

＜注意事項＞

1. 開始の合図があるまでは、机の上の問題冊子、解答用紙、実験器具箱を開けてはいけない。
2. 監督者の指示があったら、解答用紙のすべてのページの所定の箇所にチャレンジ番号と氏名を記入しなさい。
3. 試験開始後、5 ページに記載の「物理量の記法に関する注意事項」を読みなさい。続いて、6 ページ以降に記載されている「器具・部品一覧」により、すべての物品を確認しなさい。
4. 実験問題には課題 1、課題 2、課題 3 があり、どれからはじめてもよい。
5. 持参した筆記用具と、与えられた器具・部品以外は使用してはならない。携帯電話、タブレット、電子辞書などの電子機器は使用禁止である。
6. 実験結果や計算結果、式の導出など、採点して欲しい事項は解答用紙の所定の箇所に記入すること。下書き用紙とグラフ用紙は回収・採点しないので、解答はすべて解答用紙に記入すること。
7. 器具・部品に不具合がある場合は、番号札を使って監督者に申し出ること。必要に応じて交換を行うが、数には限りがあるので交換できない場合もある。
8. 試験時間中に気分が悪くなったときやトイレに行きたくなったとき、あるいは質問があるときには、番号札を使って監督者に知らせること。
9. 終了の合図があれば、直ちに解答をやめ、解答用紙を机の上に置き、監督者による回収がおこなわれるまで静かに待つこと。その後、6 ページ以降に記載の「器具・部品一覧」を参照しながら細かい部品をポリ袋などに入れ、最初の状態にして実験器具を箱の中に片付けること。ただし、デジタルマルチメーター（テストリード（赤、黒）付き）、計算機、乾電池（単三 9 個、9 V 角形 1 個）は、箱の外に置くこと。
10. ペットボトルは試験時間中は開封しないこと。終了後は持ち帰ってもよい。

目次

物理量の記法に関する注意事項	5
器具・部品一覧	6
課題 1 コンデンサー	13
課題 2 コンデンサーと静電気	17
課題 3 分子振動	27

物理量の記法に関する注意事項

物理量は、単位とその何倍であるかを表す数値の積として、物理量 = 数値 × 単位 と表記される。今回の物理チャレンジの実験課題では、国際単位系（SI）で推奨されている以下のような記法を用いる。

物理量を表す記号は斜体（イタリック体）、単位を表す記号は立体（ローマン体）で表記する。

物理量を定量的に表すときには単位をつける。このとき、単位をかつこなどで囲わない。たとえば、「自転車の速さは $v = 18 \text{ m/s}$ である。」と書き、 $v = 18 (\text{m/s})$ や $v = 18 [\text{m/s}]$ とは書かない。

表やグラフの目盛りなど、多くの数字を書くときにいちいち単位を書くのは煩わしい。この場合は以下のようにする。単位 U で表した物理量 X の数値を表やグラフに表す場合、表の見出し欄や座標軸には X/U と記す。たとえば、表やグラフに電流 I を mA 単位で表したい場合には、見出し欄や座標軸に I/mA と書く。物理量 = 数値 × 単位 なので、両辺を単位で割り算すると 物理量/単位 = 数値 となることはわかりやすい。

物理量を表す数値の自然対数を表やグラフに表す場合、たとえば、単位 V で測った電圧 V の数値の自然対数は、 $\ln(V/V)$ と記す。

器具・部品一覧

机上の物品を点検し，表の後ろにある写真も参考にしながら，以下の器具・部品があることを確かめなさい。この段階では袋を開ける必要はない。部品が不足していることがわかった場合は番号札を使って監督者を呼ぶこと。実験終了後，器具・部品はそれぞれの専用箱，小箱，ポリ袋の中に戻してもらうので，これらの梱包材は箱のふたなどの中にまとめておくこと。

【課題 1， 2， 3 に共通する器具・部品】

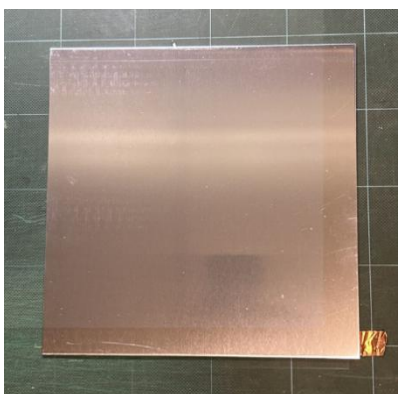
番号	品名	内容	数量	包装	確認
1	デジタルマルチメーター	テストリード（赤，黒）付き	1 台	箱の外	
2	定規	30 cm	1 本		
3	計算機		1 台	箱の外	



1. デジタルマルチメーター

【課題 1 の器具・部品】

番号	品名	内容	数量	包装	確認
1	極板 A	銅箔テープ付きアルミ板	1 枚	袋 1A	
2	極板 B	銅箔テープ付きアルミ板	1 枚	袋 1A	
3	テフロンシート	厚さ 0.10 mm	1 枚		
4	テフロンシート	厚さ 0.20 mm	1 枚		
5	テフロンシート	厚さ 0.30 mm	1 枚		
6	テフロンシート	厚さ 0.40 mm	1 枚		
7	厚紙	A4, 厚さ 1 mm	1 枚		
8	ペットボトル	2 L, 水入り	1 本	箱の外	



1. 極板 A



2. 極板 B



3~6. テフロンシート



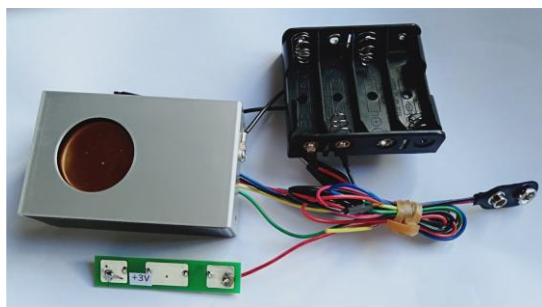
7. 厚紙



8. ペットボトル

【課題 2 の器具・部品】

番号	品名	内容	数量	包装	確認
1	電位計用プリアンプ	プリアンプ回路，コンデンサー C，円板電極 P が入ったアルミケース。9 V 角形乾電池用スナップ，電池ボックス（単三×4 個用）付き	1 個	袋 2A	
2	基準電圧源	+9 V，+3 V の電圧端子をもつ小型基板。電位計用プリアンプとリード線でつながっている。	1 個	袋 2A	
3	電位計のふた F	円形ステンレス板（直径 5 cm），表面：銅テープタブ，裏面：絶縁脚付	1 個	袋 2B	
4	グラウンド G 端子台	銅線の輪	1 個	袋 2B	
5	プローブ A	先端に 100 k Ω の抵抗がついたミノムシクリップ付きリード線	1 本	袋 2B	
6	クリップ付リード線	両端がミノムシクリップのリード線	2 本	袋 2B	
7	ポリ塩化ビニル板（塩ビ板）	15 cm×10 cm，厚さ 0.5 mm	1 枚	袋 2B	
8	ウール布切れ	ウール 100 %（18 cm×18 cm）	1 枚	袋 2B	
9	9 V 角形乾電池		1 個	袋 2C	
10	単三乾電池	1.5 V	4 個	袋 2C	



1. 電位計用プリアンプ, 2. 基準電圧源(手前)



3. 電位計のふた F



4. グランド G 端子台



5. プローブ A



6. クリップ付リード線



7. ポリ塩化ビニル板 (塩ビ板)

8. ウール布切れ



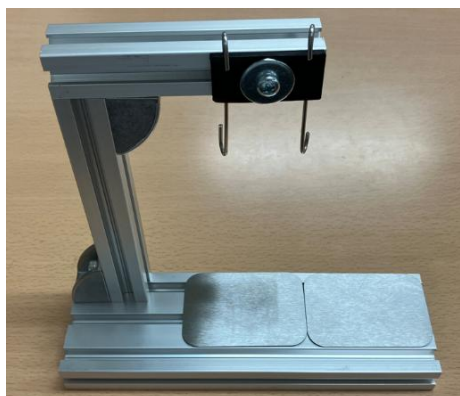
9. 9 V 角形乾電池 (左)

10. 単三乾電池 (右)

【課題3の器具・部品】

番号	品名	内容	数量	包装	確認
1	アルミフレーム	組み立て済み, フック 2 本, フック押さえ, 配置用鉄板付き	1 個		
2	分子模型	吊りひも 2 本附属	1 個	袋 3A	
3	駆動用コイル	配置用磁石付き	1 個	袋 3B	
4	駆動用回路基板セット	駆動用回路基板, IC クリップ 1 対, 電池ボックス(単三×3 個用)接続済み	1 個	袋 3C	
5	ホール素子用基板セット	ホール素子用基板, ホール素子(マウント, 配置用磁石付き)2 個, 電池ボックス(単三×2 個用)接続済み	1 組	袋 3D	
6	単三乾電池	1.5 V, アルカリ電池	5 個	袋 3E	
7	竹串	直径 (2.6 ± 0.1) mm	1 本		
8	油性ペン		1 本		
9	マスキングテープ		1 個		
10	ドライバーセット	6 本組	1 組		
11	オシロスコープ	プローブ 2 本付き (箱内)	1 台	箱の外	

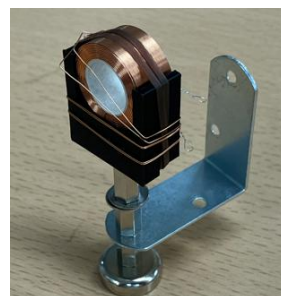
注意 4. 駆動用回路基板セット, および, 5. ホール素子用基板セットは, 取り出しのときにコードの接続が外れないように注意すること。外れた場合は監督者に知らせなさい。



1. アルミフレーム



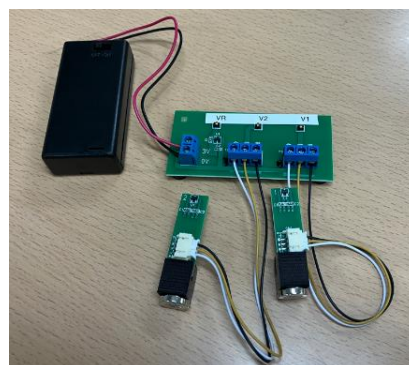
2. 分子模型
(吊りひも 2 本附属)



3. 駆動用コイル



4. 駆動用回路基板セット
(リード線の色は異なる場合がある)



5. ホール素子用基板セット



6. 単三乾電池



11. オシロスコープ
(プローブ 2 本付き)

課題 1 : コンデンサー

【課題 1 の器具・部品】

番号	品名	内容	数量	包装
1	極板 A	銅箔テープ付きアルミ板	1 枚	袋 1A
2	極板 B	銅箔テープ付きアルミ板	1 枚	袋 1A
3	テフロンシート	厚さ 0.10 mm	1 枚	
4	テフロンシート	厚さ 0.20 mm	1 枚	
5	テフロンシート	厚さ 0.30 mm	1 枚	
6	テフロンシート	厚さ 0.40 mm	1 枚	
7	厚紙	A4, 厚さ 1 mm	1 枚	
8	ペットボトル	2 L, 水入り	1 本	箱の外
共通	デジタルマルチメーター	テストリード (赤, 黒) 付き	1 台	箱の外
共通	計算機		1 台	箱の外

【課題の目的】

平行平板コンデンサーの電気容量 C は、極板間の誘電体の誘電率を ϵ 、極板の面積を S 、極板間の間隔を d とすると、

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

と表すことができる(図 1-1)。真空の誘電率を ϵ_0 とすると、

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (1-2)$$

を誘電体の比誘電率という。 $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ である。

本課題では、極板間に厚さが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を求める。



図 1-1

【実験の準備】

1. 測定の準備

- ① 1 辺 20.0 cm、厚さ 2.00 mm の極板 A および極板 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 1-2(a))。その上にテフロンシートを置き(図 1-2(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 1-2(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 1-2(d))。
- ④ デジタルマルチメーター（以下、DMM と呼ぶ）のテストリード（赤）を V/Ω/Hz ジャックに、テストリード（黒）を COM ジャックにそれぞれつなぐ(図 1-2(d))。
- ⑤ 極板 A、極板 B それぞれの銅箔テープに、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 1-2(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、監督者に知らせなさい。

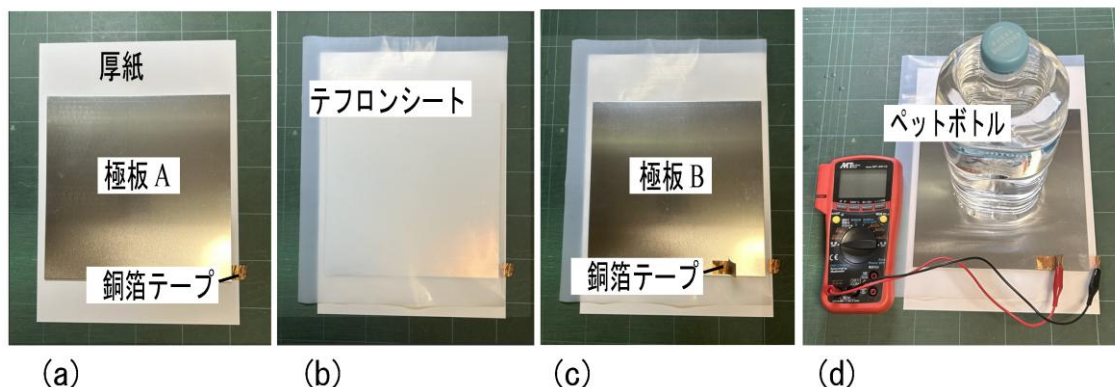


図 1-2

2. デジタルマルチメーター (DMM) による測定

① テストリード (赤, 黒) のミノムシクリップをどこにもつながらない状態で, 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 1-3(a)).

② DMM 右上の相対値ボタン (右側黄) を押すと, 表示器に 00.00 μF と表示される(図 1-3(b)). 00.00 μF 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こと。それでも表示されないときは, 監督者に知らせなさい。この状態

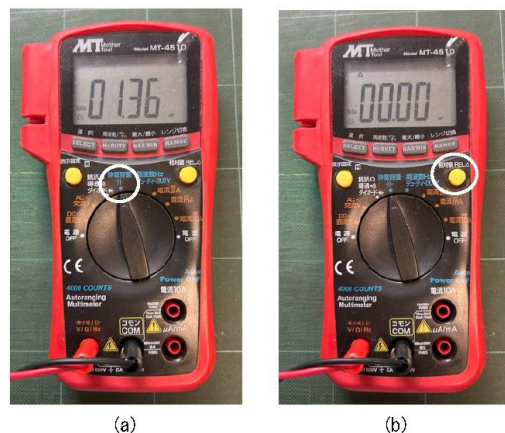


図 1-3

でテストリード (赤, 黒) のミノムシクリップを極板 A と極板 B にそれぞれつなぐと, AB 間の電気容量が表示される。

③ 測定のたびに, まず **1. 測定の準備**⑤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 μF 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。

【平行平板コンデンサの電気容量と誘電率の測定】

本課題では, 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の形状より, テフロンの比誘電率 ϵ_r を求める。

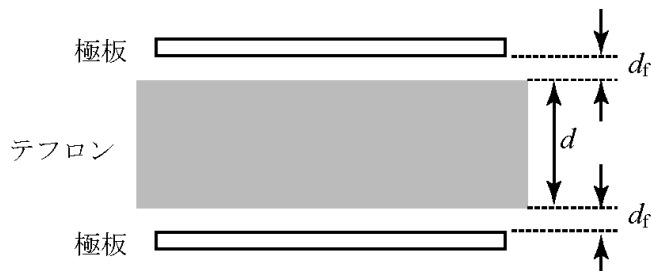


図 1-4

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 1-4 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。

したがって, 図 1-4 のコンデンサは, 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 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 C_2 が直列接続されたものと考えることができる。空気の比誘電率はほぼ 1 なので, 全体の電気容量 C は, 式(1-1)および式(1-2)より,

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{d}{\epsilon_r \epsilon_0 S} + \frac{2d_f}{\epsilon_0 S} \quad (1-3)$$

となる。

式(1-3)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 は極板にかか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, かかる圧力が一定となるように条件をそろえるのはこのためである。

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、**2. DMM による測定の手順②③**を正しく守ること。すべての測定を終えた後、DMM のロータリースイッチを「電源 OFF」の位置に戻しなさい。

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。

課題 2： コンデンサーと静電気

【課題 2 で使用する器具・部品】

番号	品名	内容	数量	包装
1	電位計用プリアンプ	プリアンプ回路, コンデンサーC, 円板電極Pが入ったアルミケース。9V 角形乾電池用スナップ, 電池ボックス(単三×4 個用) 付き	1 個	袋 2A
2	基準電圧源	+9V, +3V の電圧端子をもつ小型基板。電位計用プリアンプとリード線でつながっている。	1 個	袋 2A
3	電位計のふた F	円形ステンレス板 (直径 5 cm), 表面: 銅テープタブ, 裏面: 絶縁脚付き	1 個	袋 2B
4	グラウンド G 端子台	銅線の輪	1 個	袋 2B
5	プローブ A	先端に 100 k Ω の抵抗がついたミノムシクリップ付きリード線	1 本	袋 2B
6	クリップ付リード線	両端がミノムシクリップのリード線	2 本	袋 2B
7	ポリ塩化ビニル板 (塩ビ板)	15 cm×10 cm, 厚さ 0.5 mm	1 枚	袋 2B
8	ウール布切れ	ウール 100 % (18 cm×18 cm)	1 枚	袋 2B
9	9V 角形乾電池		1 個	袋 2C
10	単三乾電池	1.5 V	4 個	袋 2C
共通	デジタルマルチメーター	テストリード (赤, 黒) 付き	1 台	箱の外
共通	定規	30 cm	1 本	

【課題の目的：静電気とその測定】

本課題では、コンデンサーを使って静電気に関する実験を行う。静電気は身の回りでよく見られる物理現象であり、乾燥した冬にドアを開けようとドアノブに触れた瞬間にバチッと衝撃を感じることは誰でも経験するが、その原因は静電気である。すべての物体は正の電荷を持つ原子核と負の電荷を持つ電子とから成り立っており、本来両者の総電荷が等しいため電気的には中性である。何らかの原因でこのバランスが崩れると物体は帯電し、それが継続すると静電気を帯びた状態になる。静電気が発生する仕組みは複数あるが、異なった物質を擦（こす）るときに生じる摩擦帯電現象もその一つであり、平賀源内が復元したエレキテルはこれを応用した静電気発生装置である。

電気に関する基本的事項を手短かにまとめておこう。(1) 全電気量は不変であり、電気的に中性であった物体の一部が正に帯電すれば、その他の部分に同量の負電荷がある。(2) 異符号電荷は引き合い、同符号電荷は反発する。(3) 金属には自由電子があり、電場があると自由電子は電場方向と逆向きに動く。その結果、電池等につながっていない孤立した金属の内部には電場がなく、電位はいたるところ等しくなる。(4) 絶縁体は自由電子がないため、帯電状態が続く。ただし、絶縁体も高いながらその電気抵抗は有限であるため、時間が経つと電荷は減る。特に、絶縁体の表面の電気抵抗は内部より格段に小さい場合がある。また、空気に逃げる電荷もある。これらを総称して放電と呼ぶ。

本課題では、電荷をコンデンサーにためて測る。コンデンサーの 2 つの電極には異符号の同量の電荷をためることができる。その電気量 Q とコンデンサーの電圧 V 、コンデンサーの静電容量 C は

$$Q = CV$$

の関係で結ばれている。

この式が示すように、コンデンサーの電気量を知るためには電圧を測ればよい。ただし、普通の電圧計では大きな問題がある。たとえば、本実験問題で使用しているデジタルマルチメーター（以下、DMM と呼ぶ）を電圧測定モードにしたとき、その入力抵抗 R は $10\text{ M}\Omega$ であり、多くの用途には十分高い抵抗であると言えるが、 $C = 1\text{ nF} = 10^{-9}\text{ F}$ のコンデンサーが $Q = 1\text{ nC} = 10^{-9}\text{ C}$ (C : クーロン) の電荷で充電されている状態での電圧 ($V = Q/C = 1\text{ V}$) をこの DMM で測れるだろうか？この場合、DMM につないだ瞬間に $I = V/R = 10^{-7}\text{ A}$ の電流が流れるので、約 0.01 秒後にはコンデンサーに残る電荷はほぼなくなってしまうことになる。つまり、このような測定には $10\text{ M}\Omega$ は抵抗が低すぎて、測ることはできない。

【電位計】

本課題では、この困難を克服するためにプリアンプを用いる（図 2-1）。プリアンプは入力端子(in)とグランド端子(G)、出力端子(out)を持ち、入力端子とグランド端子の間の電圧を電圧増幅率 = 1 で出力する。入力端子に流れる電流は非常に小さく、 10^{-14}A 以下であるという特性をもつため、プリアンプと DMM を組み合わせることで理想に近い電圧計ができる。上の例にこの電圧計を使った場合、電荷が放電してしまう時間は約 10^5s であり、測定に 10s を要するとしても、その間の電圧変化は高々 0.01% にすぎない。ただし、回路が正常に動作するのは約 $-5\text{V} \sim +7\text{V}$ の電圧範囲に限られる。

電位の基準 ($U = 0\text{V}$) は任意に決めることができる。プリアンプのグランド端子は常にこの基準位置につながぐことにすれば、DMM は入力端子をつないだ位置の電位を表示することになる。実験ではこのような使い方をするので、以降は（プリアンプ+DMM）を電位計、基準位置をグランド G と呼ぶことにする。

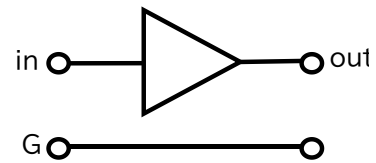


図 2-1. プリアンプ

以下の実験では、この電位計の入力に 1nF のコンデンサー C と直径 3cm の円板電極 P を取り付けた装置を使う。装置は近似的に図 2-2 ようにみなすことができる。図中の V は理想的な電圧計、G はグランドである。 R_{in} は電位計の入力抵抗を表し、 $R_{in} > 10\text{T}\Omega = 10^{13}\Omega$ ，入力電流 I_b は約 $10\text{fA} = 10^{-14}\text{A}$ である（T（テラ）と f（フェムト）は単位の接頭辞で、 $\text{T} = 10^{12}$ ， $\text{f} = 10^{-15}$ を表す）。 $10\text{T}\Omega$ は非常に高い抵抗であり、絶縁体と言われているものがこれより低い抵抗しか持たないケースがしばしばある。また、 10fA は電子の流れに換算すると約 60000 個/秒に過ぎない小さな電流である。そのため、この装置は周囲から様々な影響を敏感に受ける。上で説明したように、この装置の出力 (DMM が表示する値) はコンデンサー C の両端電圧に等しいことを覚えておこう。

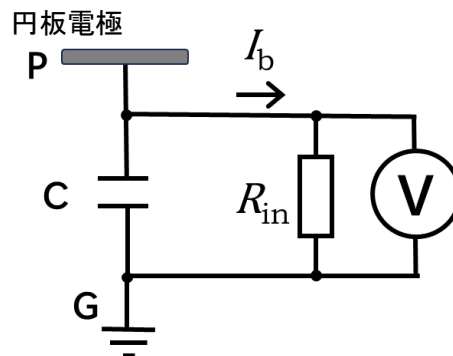


図 2-2. 実験装置の近似回路

【実験の準備】

プリアンプ、基準電圧源、DMM、電池、グランド端子台を以下の手順に従って、図 2-3 のようにつなぎなさい。

- ① プリアンプ回路、1 nF のコンデンサーC、円板電極 P はアルミケースの中に予め組み立てられている。アルミケースの丸穴から見える丸い銅板が円板電極 P である。図 2-3 のように、ケースからは出力(out)リード線（黄）、正電源リード線（赤）、負電源リード線（黒）、グランド線（緑）が出ている。なお、青のリード線は予備用出力端子であり、今回は使わない。また、アルミケースにもグランド線（黒）が取り付けられている。
- ② プリアンプのグランド線（緑）、アルミケースのグランド線（黒）、DMM の COM ジャックへ接続したテストリード（黒）、基準電圧源の 0V 端子、電源のグランド線（9V 角形乾電池の-端子と電池ボックスの+端子につながっている線）をそれぞれのミノムシクリップによって（グランド）G 端子台（銅線の輪）につなぎなさい。これによってこれらの電位は等しくなり、上記のように、これを電位の基準（ $U = 0 \text{ V}$ ）とする。
- ③ DMM の V/ Ω /Hz ジャックへ接続したテストリード（赤）のミノムシクリップをプリアンプの出力(out)リード線（黄）につなぎなさい。
- ④ プリアンプの電源のスナップに 9V 角形乾電池を取り付けなさい。また、電池ボックスに 1.5V 単三乾電池 4 個を入れなさい。
- ⑤ DMM のロータリースイッチを回し、「DC 直流 V」にしましなさい。これによって直流電圧測定モードに設定され、表示器の値は黒い側（COM ジャック）に対する赤い側（V/ Ω /Hz ジャック）の端子の電位（両者間の電圧）を意味する。

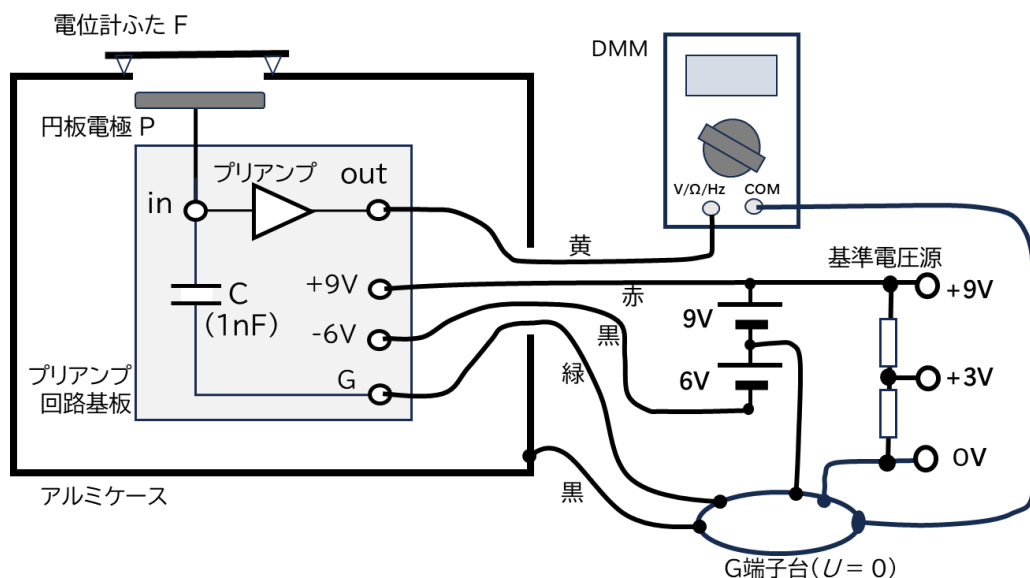


図 2-3. 実験装置の組立図

デジタルマルチメーター (DMM) の使用法

DMM による直流電圧測定は以下のように行いなさい。

- ① ロータリースイッチを回し、「DC 直流 V」の位置にする。(表示器に「DC」「Auto」の文字が表示される。)
- ② 電圧測定は、オートレンジ（「Auto」と表示される）で測定しなさい。オートレンジでは入力に応じて最適の（有効数字の桁数が最大となる）レンジが選ばれる。ロータリースイッチによる機能選択直後はオートレンジになっている。レンジを手動で変更するには RANGE ボタンを押す。押すたびに次のレンジに変更される。オートレンジに戻すには、そのボタンを長押し（約 1 秒）する。
- ③ 電源電池の消耗を防止するため、何も操作せずにいると、約 9 分後にピーピー音がなり、約 10 分後には自動的に電源が OFF となる。元の測定を継続するには、表示固定ボタン（黄）を押せば良い。再開後、HOLD マークが表示されていたら、もう一度押して HOLD マークを消す。あるいは、SELECT ボタンを押しながらロータリースイッチを「DC 直流 V」の位置にすると、オートパワーOFF 機能は解除される。

【確認問題】

実験装置が正しく組み立てられていることを確認するために、以下の測定を行いなさい。もし書かれていることと違う結果が得られた場合には、装置が図 2-3 のように組み立てられているかをもう一度確認してから、やり直しなさい。確認しても直らない場合は、監督者を呼び、状況を説明し、その指示に従いなさい。

チェック課題 A： 基準電圧の確認

DMM のテストリード（赤）のミノムシクリップを出力リード（黄）から外して、基準電圧源の+9 V 端子および+3 V 端子につなぎ、それぞれの電圧を測定し、解答用紙に書きなさい。それらがそれぞれ+8.7 V～+10.0 V、+2.9 V～+3.4 V の電圧範囲に入っていることを確認し、確認欄にチェックしなさい。

※ 基準電圧源の基板のパターン面には、ハンダメッキされた面積の広い電極が 3 ヶ所あり、赤色リードが付いた方から順に、9V 電極、3V 電極、0V 電極である。(3V 電極の裏面には「6V」と印刷されているが、これは誤りであり無視しなさい。) リード線を電極につなぐ場合は、ミノムシクリップで基板の対応する位置をはさみなさい。時に、電極とクリップの接触が悪い場合があるので、クリップの歯が電極に食い込むように力をかけなさい。

チェック課題 B： グランド (G) 電位の確認

再び、DMM のテストリード（赤）のミノムシクリップを出力リード（黄）につなぎなさい。プローブ A のミノムシクリップを G 端子台につないだ上、電位計のふた F を外し、

プローブ A の先端で円板電極 P に約 1 秒間軽く触れて離しなさい。プローブ A を離して約 3 秒後の DMM の値を読み、解答欄に記入しなさい。さらに、約 15 秒毎に計 4 回 DMM の値を確認し、その値を記入しなさい。時間間隔はおおよそでよい。

接触直後の値が $-0.01\text{ V} \sim +0.01\text{ V}$ であること、また約 1 分間の電圧変化が 0.02 V 以内であることを確認し、チェックしなさい。

※ 最初の操作によってコンデンサー C の電荷は放電されるため、DMM は本来 0.0 mV を表示するはずである。しかし、実際には小さい値が残る。これは回路の不完全性によるもので、オフセット電圧と呼ばれている。

チェック課題 C： 漏れ電流の確認

プローブ A のミノムシクリップを基準電圧源の $+3\text{ V}$ 端子につないだ上、プローブ A の先端で円板電極 P に約 1 秒間触れて離しなさい。プローブ A を離して約 3 秒後の DMM の値を読み、解答欄に記入しなさい。さらに、約 15 秒毎に計 4 回 DMM の値を確認し、その値を記入しなさい。時間間隔はおおよそでよい。

接触後の電圧値がチェック課題 A で測定した $+3\text{ V}$ 端子の電圧との差が 0.1 V 以内であること、また約 1 分間の電圧変化が 0.02 V 以内であることを確認し、チェックしなさい。

以上で実験の準備は完了である。

引き続いて以下の実験を行い、各問に答えなさい。

【課題 2-1：摩擦帯電現象】

最初の実験は電位計の金属製のふた F がない状態で行うので、ふた F がついている場合はふた F を外しなさい。

次に、プローブ A のミノムシクリップを G 端子台につなぎ、プローブ A の先端を円板電極 P に軽く触れ、コンデンサー C の電荷を放電しなさい。(以下、この操作を毎回行うので、コンデンサー C の放電と名付ける。)

問 2-1a 塩ビ板の場合

- ① ポリ塩化ビニル板（塩ビ板）をウール布で数回強く擦（こす）った後、塩ビ板を円形孔の上方約 1 cm まで円板電極 P に近づけ、そのときの DMM の値を表に書き入れなさい。値は擦り方、距離によっても変わるので、以上の実験は 3 回行いなさい。
- ② 塩ビ板を近づけたり遠ざけたりしたとき、DMM の値にどのような変化があるかを観察し、観察結果を文章で書きなさい。

注意：塩ビ板の外周は尖っていることがあるので、取り扱いに注意しなさい。

問 2-1b ウール布の場合

- ① 再びプローブ A を使ってコンデンサー C の電荷を放電した後、今度は塩ビ板を擦ったウール布の方を円形孔の上方約 1 cm まで円板電極 P に近づけ、そのときの DMM の値を表に書き入れなさい。値は擦り方、距離によっても変わるので、以上の実験は 3 回行いなさい。
- ② ウール布を近づけたり遠ざけたりしたとき、DMM の値にどのような変化があるかを観察し、観察結果を文章で書きなさい。

問 2-1c

塩ビ板はウール布で擦ると帯電することが知られている。実験装置を簡略化すると図 2-4 のようであることを踏まえ、問 2-1a、2-1b で観察した現象はどのように理解することができるか、説明しなさい。必要であれば説明に図を用いてもよい。

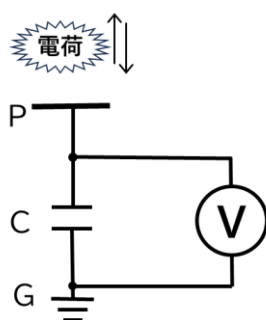


図 2-4

問 2-1d

問 2-1a で使った塩ビ板は正に帯電していただろうか、あるいは負であっただろうか。理由とともに答えなさい。

【課題 2-2 : ふた F の効果】

次の実験は、電位計のふた F をかぶせた状態で行う。ふた F は金属（ステンレス）製で、裏面についている脚は絶縁体（ゴム）である。表面についている銅テープタブはふた F と電氣的につながっている。ふた F はアルミケースの円形孔のふたとして使う。ふたをするときはゴム脚を下にしてのせなさい。

問 2-2a 絶縁されたふたの場合

- ① プローブ A を使ってコンデンサー C を放電した後、電位計のふた F を円形孔の上にかぶせ円板電極 P が見えないようにしなさい。このとき、ふた F は絶縁脚でアルミケースにのっており、直接アルミケースなどに触れることがないようにしなさい。
- ② 問 2-1a と同様に、ウール布で数回擦った塩ビ板を円形孔の上方約 1 cm まで円板電極

P に近づけ、そのときの DMM の値を表に書き入れなさい。値は擦り方、距離によっても変わるので、以上の実験は 3 回繰り返しなさい。

- ③ ウール布で擦った塩ビ板を近づけたり遠ざけたりしなさい。このとき、DMM の値の変化は、問 2-1a と比べて、どのように変わったか／変わらなかったかを文章で説明しなさい。

問 2-2b グランド G につながれたふたの場合

- ① プローブ A を使ってコンデンサー C を放電した後、再びふた F を円形孔にかぶせ、さらに F の銅テープタブと G 電極を両端クリップ付リード線のクリップではさみ、つなぎなさい。
- ② 問 2-1a, 2-2a と同様に、ウール布で数回擦った塩ビ板を円形孔の上方約 1 cm まで円板電極 P に近づけ、そのときの DMM の値を表に書き入れなさい。以上の実験は 3 回繰り返しなさい。
- ③ ウール布で擦った塩ビ板を近づけたり遠ざけたりしなさい。このとき、DMM の値の変化は、問 2-1a, 2-2a と比べて、どのように変わったか／変わらなかったか。文章で説明しなさい。

問 2-2c

問 2-2a, 2-2b で観察した結果はどのように理解できるか、説明しなさい。必要であれば説明に図を用いてもよい。

【実験 2-3 : 円板電極 P とふた F の間の静電容量】

電位計のふた F を外し、G 端子台につないだプローブ A の先端で円板電極 P に軽く触れ、コンデンサー C の電荷を放電した上、再度ふた F を円形孔の上にかぶせなさい。このとき、ふた F は絶縁脚でアルミケースにのっており、直接アルミケースなどに触れることがないようにしなさい。

問 2-3a

電位計のふた F の銅テープタブをクリップ付きリード線のクリップではさみ、その他端を G 端子台につないだ場合と 9V 端子につないだ場合の DMM の値をそれぞれ記入しなさい。変化は小さいので複数回測定しなさい。

問 2-3b

電位計に使われているコンデンサー C の静電容量は 1.00 nF である。実験結果から、円板電極 P と電位計のふた F の間の静電容量を求めなさい。計算過程も書くこと。必要であれば説明に図を用いてもよい。

【実験 2-4：静電気の電位】

電位計のふた F を外し, G 端子台につないだプローブ A の先端で円板電極 P に軽く触れ, コンデンサー C の電荷を放電した後, あらためて電位計のふた F を円形孔の上にかぶせなさい。このとき, 電位計のふた F はアルミケース等と絶縁し, リード線もつけないこと。

問 2-4a

問 2-2a と同様にウール布で擦った塩ビ板を近づけ, 最終的に電位計のふた F の上にのせなさい。塩ビ板をのせた直後の DMM の値を記入しなさい。以上の実験は 3 回行いなさい。

問 2-4b

問 2-4a で塩ビ板をふたにのせたときのふた F の電位は何 V であるか。絶対値が最も大きい実験結果の場合について見積もりなさい。

問 2-4c

交流 100 V の電源リード線の近くに配置された微小信号用のリード線には電源と同じ周波数の交流雑音信号が入ることがある。これまでの実験を基に, この雑音の混入を小さくするために試みるべき対策を考え, その対策が有効である理由とともに答えなさい。

単三乾電池を電池ボックスから取り出し, 9 V 角形乾電池を電池スナップから取り外しなさい。DMM のロータリースイッチを「電源 OFF」の位置に戻しなさい。

課題 3 : 分子振動

【課題 3 の器具・部品】

番号	品名	内容	数量	包装
1	アルミフレーム	組み立て済み, フック 2 本, フック押さえ, 配置用鉄板付き	1 個	
2	分子模型	吊りひも 2 本附属	1 個	袋 3A
3	駆動用コイル	配置用磁石付き	1 個	袋 3B
4	駆動用回路基板セット	駆動用回路基板, IC クリップ 1 対, 電池ボックス(単三×3 個用)接続済み	1 個	袋 3C
5	ホール素子用基板セット	ホール素子用基板, ホール素子(マウント, 配置用磁石付き)2 個, 電池ボックス(単三×2 個用)接続済み	1 組	袋 3D
6	単三乾電池	1.5 V, アルカリ電池	5 個	袋 3E
7	竹串	直径 (2.6 ± 0.1) mm	1 本	
8	油性ペン		1 本	
9	マスキングテープ		1 個	
10	ドライバーセット	6 本組	1 組	
11	オシロスコープ	プローブ 2 本付き (箱内)	1 台	箱の外
共通	デジタルマルチメーター	テストリード (赤, 黒) 付き	1 台	箱の外
共通	定規	30 cm	1 本	
共通	計算機		1 台	箱の外

注意 4. 駆動用回路基板セット, および, 5. ホール素子用基板セットは, 取り出しのときにコードの接続が外れないように注意すること。外れた場合は監督者に知らせなさい。

【課題の目的】

大気中の CO_2 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して地球温暖化をもたらす。そのため、温室効果ガスの一種である。本課題では、 CO_2 分子の分子振動を調べるため、ばねとおもりでできた CO_2 分子の模型（分子模型）を使い、その力学的なふるまいを観測する。

【分子模型の力学】

分子模型の構成

CO_2 分子の振動運動を図 3-1 に示す分子模型で調べる。 CO_2 分子は、つりあいの状態では直線上に等間隔で O, C, O の順に原子が並んでいる。原子を貫く軸を分子軸と呼ぶ。分子模型は、コイルばねと 3 個のおもりからできている。おもり 1, 2, 3 は鉛玉と位置検出用円盤磁石（以下、位置検出用磁石と呼ぶ）で構成され、おもり 1, 3 にはさらに駆動用円盤磁石（以下、駆動用磁石と呼ぶ）が取り付けられている。本課題では分子模型の軸も分子軸と呼ぶ。この分子模型では、ばねの伸縮による振動のほかに、ばねの曲げによる振動も観察できる。

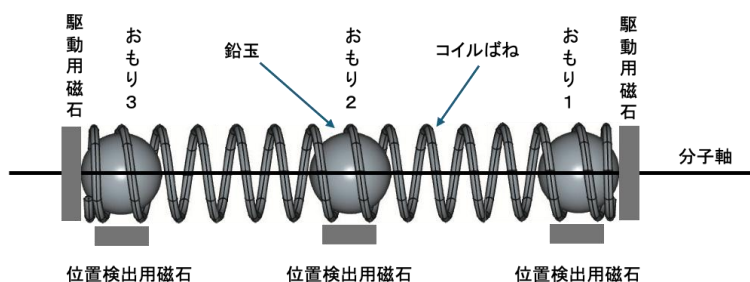


図 3-1. 分子模型

分子模型の振動運動

分子模型のおもりの運動をその大きさを無視した質点の運動とみなして考える。

はじめに、質量 M のおもり 2 個をばね定数 k のばねでつないだ二原子分子（たとえば、 N_2 分子）の分子模型を考える。外力なしですべてのおもりが同じ振動数で振動する**固有振動**は、ばねの伸縮にともないおもりが対称に変位して、その固有振動数 f_{DAM} は

$$f_{\text{DAM}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2k}{M}} \quad (3-1)$$

となる。

本課題では、図 3-1 のような三原子分子の分子模型を考える。力学の計算から、ばねが伸縮する分子軸方向では 2 種類の固有振動（以下、モードと呼ぶ）A, B があり、それぞれに対応したおもりの変位のしかたがある。モード A, B のそれぞれの固有振動数 f_A, f_B は、伸びのばね定数を k 、おもり 1, 2, 3 の質量をそれぞれ M, m, M とすると、

$$f_A = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M}} \quad (3-2)$$

と

$$f_B = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M} \left(1 + \frac{2M}{m}\right)} \quad (3-3)$$

である。おもりが分子軸に垂直な方向に変位するモード C の固有振動数 f_C は、曲げのばね定数を k' とすると

$$f_C = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k'}{M} \left(1 + \frac{2M}{m}\right)} \quad (3-4)$$

で与えられる。

固有振動と共振

振り子をつりあいから少しずれた位置で放すと一定の周期で振動する。これは変位に比例する復元力が働くためであり、その振動数を**固有振動数**という。一方、周期的外力を受け続ける分子模型や建築物は外力と同じ周期で振動する。振動の振幅は、はじめ増えるが、やがて定常状態に達する。これは、現実の物体では摩擦があるためである。定常状態の振幅は加える外力の振動数に依存して変わり、物体の固有振動数に近いとき最大になる。これを**共振**といい、そのときの振動数(周波数)を**共振周波数**という。**共振**を観察することにより、物体の固有振動の固有振動数や変位のしかたを知ることができる。

【課題 3-1：固有振動数の予測】

問 3-1

分子模型のばねの伸びのばね定数を $k = 1.1 \text{ N/mm}$ 、曲げのばね定数を $k' = 0.11 \text{ N/mm}$ として、モード A, B, C のそれぞれの固有振動数の計算値 $f_{A,cal}$, $f_{B,cal}$, $f_{C,cal}$ を式(3-2), (3-3), (3-4)を用いて求めなさい。各おもりの鉛玉と位置検出用磁石は一体で運動し、おもり 1 とおもり 3 はさらに駆動用磁石とも一体で運動する。鉛玉の質量は 1 個 5.9 g, 位置検出用磁石の質量は 1 個 0.5 g, 駆動用磁石の質量は 1 個 1.9 g である。ばね, および, 図 3-1 には描かれていない分子模型を吊るための吊りひも, おもりと磁石をばねに固定する部品の質量は無視しなさい。計算過程も書きなさい。 $f_{A,cal}$ が 50 ~ 70 Hz の範囲内にならなかった場合は計算をやり直しなさい。

＜実験装置の概要とその配置＞

図 3-2 は、机の上に配置した装置の全体配置図である。力学系には、アルミフレームに吊るされた分子模型と、その右わきに駆動用コイル(以下、コイルと呼ぶこともある)がある。駆動用回路基板からコイルに周期的に時間変化する電流が送られ、生じた磁場は、おもり 1 に付けた駆動用磁石を通じて分子模型に周期的な力を加える。その周波数は、デジタルマルチメーター (以下、DMM と呼ぶ) で読み取る。分子模型のおもりの変位は、おもりの下に付けた位置検出用磁石のつくる磁束密度の変化としてホール素子で検出される。検出された信号電圧は、ホール素子用基板を経てオシロスコープで観察される。図 3-2 を参考にして、装置を配置しなさい。

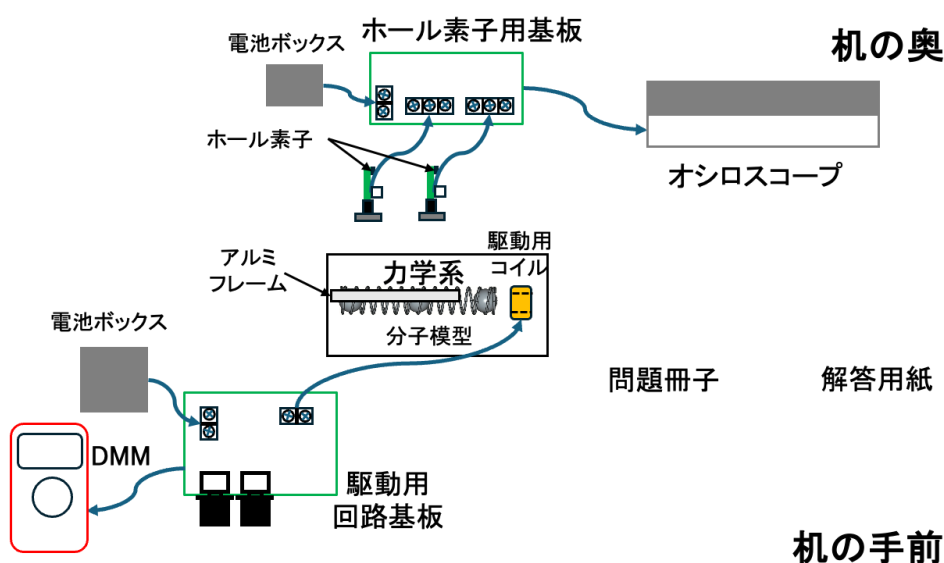


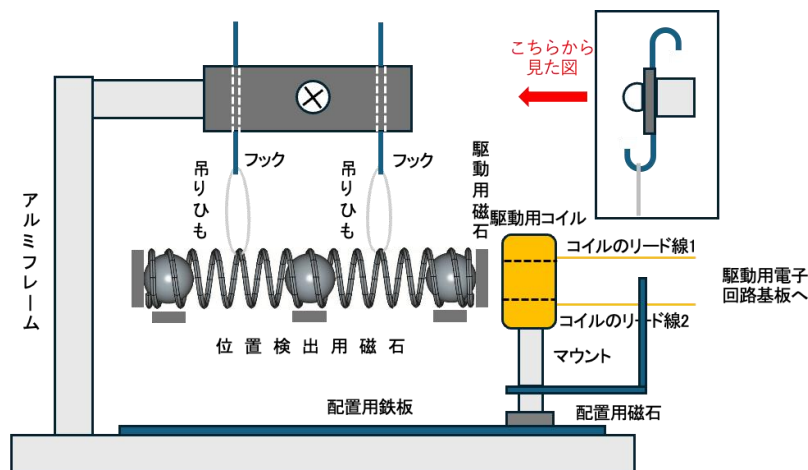
図 3-2. 装置の全体配置図

(鉛直上方から見下ろした図。ホール素子は課題に応じて配置)

＜駆動用コイルによる分子模型の振動の駆動機構＞

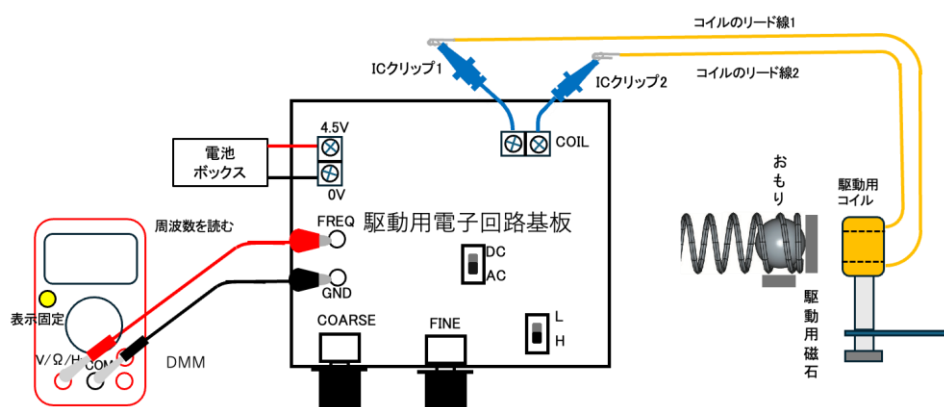
図 3-3 のように、アルミフレームを机の上に立てなさい。手でフックを回して、挿入図のように向けなさい。2 本の吊りひもは、図 3-3 のように、分子模型の中央のおもり上部のコイルばねのコイル線から左右に 3 番目のコイル線にかけなさい。分子模型を吊りひもがねじれないようにしてフックに架けなさい。分子模型の左右はどちらでも構わない。位置検出用磁石が真下になるように、分子模型を回して調整しなさい。コイルを、分子軸の延長線上で駆動用磁石との間隔(隙間の長さ、以下でも同様)が約 5 mm の位置に、図 3-3 の向きで置きなさい。コイルは下部の配置用磁石で配置用鉄板上に固定することができる。フックを手で上下に動かして、分子軸が水平で高さがコイルの軸とそろうようにしなさい。後で再調整するので大まかな調整でよい。フックを動かしにくい(または、動いてしまう)場合は、フックを押さえている板の止めネジの締め具合を太いプラスドライバーで調節しなさい。

分子模型の高さがうまく調節できない、アルミフレームの梁と平行にならないなどの場合は監督者に知らせなさい。



〈駆動用コイルの配線と手順〉

図 3-4 に駆動用コイルの配線を示す。



- (1) 電池ボックス（以下、駆動回路電源と呼ぶ）のスイッチを OFF にしてから、電池を入れなさい。電池ボックスのふたを強く押しながらコードが出ている方向にスライドするとふたが開く。
- (2) コイルの支持部に巻きつけてあるリード線を伸ばしなさい。コイルのリード線 1,2 の端は、被覆をはがしねじってある。その部分を IC クリップ 2 個の先端でそれぞれはさみなさい。IC クリップ本体のコード側を先端方向に押しと、クリップの先端がプラスチック部分から押し出される。短絡しないように IC クリップ同士を遠く離して置きなさい。
- (3) 駆動用回路基板(以下、回路基板と呼ぶ)の交流 (AC) 直流 (DC) スwitch を DC に

し、駆動回路電源を ON にしなさい。コイルに直流電流が流れ磁場が発生する。周波数帯スイッチは低周波数帯 (L) と高周波数帯 (H) のどちらでもよい。

- (4) 手順(3)で分子模型がコイルに引き付けられた場合は、手順(5)に進みなさい。分子模型がコイルから反発された場合は、駆動回路電源を OFF にしてから、IC クリップとコイルのリード線の組み合わせを入れ替えなさい。再び駆動回路電源を ON にして、分子模型がコイルに引き付けられることを確認しなさい。

- (5) 駆動回路電源を OFF にしなさい。

コイルに電流を流す必要のないときは、駆動回路電源をいつも OFF にしなさい。

- (6) 短絡しないように、コイルのリード線と IC クリップの接続部分をマスキングテープで覆いなさい。

- (7) 図 3-4 のように、ミノムシクリップのついたテストリード (赤) で DMM の V/ Ω /Hz ジャックと回路基板上の FREQ 端子をつなぎ、テストリード (黒) で DMM の COM ジャックと回路基板上の GND 端子をつなぎなさい。ミノムシクリップは洗濯ばさみと同様、コード側を指でつまむと先端の金属製の部分が開くので、その間に端子をはさみなさい。DMM の大きなダイヤルを「電源 OFF」の位置から黄色の「表示固定」ボタンを押しながら回して、「周波数 Hz」に合わせなさい。(太字部分はオートパワーオフの機能を停止するための操作)

- (8) 回路基板の交流直流スイッチを AC にして、駆動回路電源を ON にしなさい。

- (9) DMM は回路基板が発生する電気信号の周波数を表示する。周波数は、粗調 (COARSE) つまみを回すと大きく粗く、微調 (FINE) つまみを回すと小さく細かく変化するので、それを確認しなさい。回路基板の周波数帯スイッチが H の場合はおよそ 50 ~ 160 Hz, L の場合はおよそ 20 ~ 60 Hz の電気信号が発生する。周波数がおよその範囲で可変であることを確認しなさい。

周波数の可変範囲が上記と大きく異なるときは、監督者に知らせなさい。

- (10) コイルを手で軽くつまんで、振動していることを確認しなさい。振動を感じれば、時間変動する磁場が発生している。

振動が確認できなければ、監督者に知らせなさい。

- (11) 回路基板の周波数帯スイッチを H にしなさい。

【課題 3-2 : モード A の共振の目視による観測】

問 3-2

コイルに流す電流の周波数を問 3-1 で求めた $f_{A,cal}$ の近くで変えながら分子模型の振動のようすを目視と音で観察し、振動の振幅が大きくなる共振を探しなさい。そのときの周波数 f_A' (共振周波数 f_A の概略値) を DMM で読み取りなさい。共振すれば分子模型は激しく振動する。後に振幅を定量的に測定するので、共振を探すために時間をかけなくてよい。共振周波数は $f_{A,cal}$ の前後 15 % 程度の範囲内にある。

＜オシロスコープによる測定の準備＞

1. 取り出しと電源接続

- (1) 本体、2本のプローブ（赤、黄）、電源コードを箱から取り出さない。それ以外の部品類はオシロスコープの箱の中に入れておきなさい。
- (2) 電源コードを本体後面に取り付け、AC電源（100 V）のコンセントに接続しなさい。



図 3-5. オシロスコープの（左）箱，（中央）本体，（右）プローブ

2. プローブの接続

- (1) 図 3-6 のように、プローブ（赤）の BNC 型プラグの凹部と CH1 の凸部を合わせて差し込み、時計回りにカチッと止まるまで回しなさい。



図 3-6. プローブとオシロスコープの接続

- (2) プローブ（黄）の BNC 型プラグをオシロスコープの CH2（CH1 の右隣）に接続しなさい。
- (3) 2本のプローブのプローブ・ヘッドのスライドスイッチが「10×」側を選択していることを確認しなさい。「1×」側になっていたら「10×」側に直しなさい。



図 3-7. プローブ（赤）のプローブ・ヘッドのスライドスイッチ

3. オシロスコープの初期設定

- (1) 上面左端の電源スイッチを押し、方眼目盛りの画面が表示されるまで待ちなさい。図 3-8 の①Utility ボタンを押し、続けて②H1(Function)ボタンを押しなさい。(電源投入後の画面は様々で、下の画面と異なる場合が多い。)

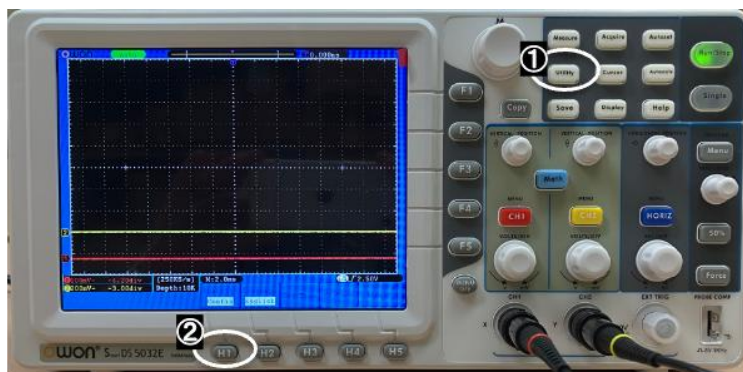


図 3-8. オシロスコープの初期設定(1)

- (2) 図 3-9 のように画面左に③Function メニューが現れるので、④M ダイヤルを回し (反時計回りに回すとハイライト表示された項目が下に移動, 時計回りに回すと上に移動), Adjust を選択しなさい。すると、画面下の H1 ボタンが Function[Adjust] となり、⑤H3 が Default ボタンとなる。そこで、⑤H3(Default)ボタンを押すと、カチャッと音がして初期設定され、画面のように赤, 黄の 2 本のラインが現れる。現れない場合は再度⑤H3 ボタンを押しなさい。

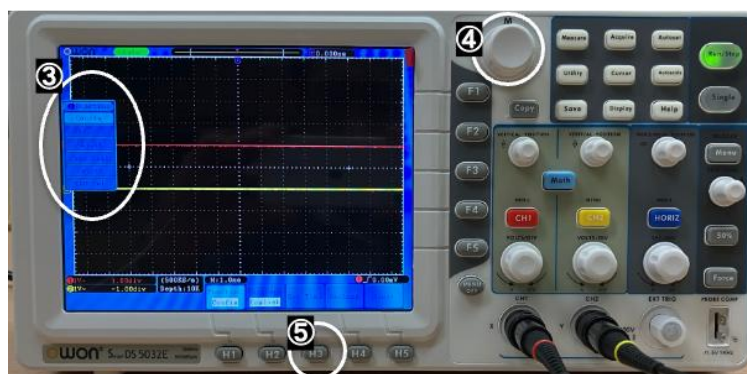


図 3-9. オシロスコープの初期設定(2)

4. オシロスコープの CH1 と CH2 の設定

- (1) 図 3-10 の①CH1 ボタンを押すと、②H1 の上に Coupling AC と表示されるので、②H1(Coupling)ボタンを押しなさい。すると、画面右側に③Coupling メニューが表示されるので、④F1(DC)ボタンを押して選択しなさい。⑤VOLS/DIV つまみを回し (DIV あるいは div は画面の枠の 1 マスを表す。図 3-10 の右図を見なさい。), 縦軸 1 マスあたりの電圧を変更し、⑥画面左下の赤文字の表示を「①200mV-」としなさい。

い。(①はCH1, 200mVは200 mV/DIV, 200mVの右の-はCoupling DCを表す。Coupling ACの場合は~と表示される。) ⑦VERTICAL POSITIONつまみを回して赤のラインを画面の上下中央にすると, ⑥画面左下の赤文字の表示は「①200mV-0.00div」となる。この操作により, 画面の下端は-1 V, 上端は1 Vとなる。

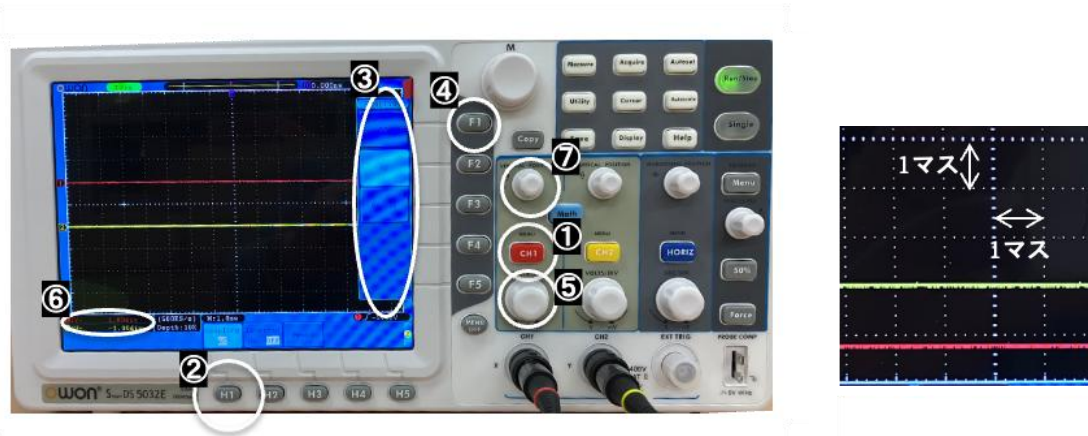


図 3-10. オシロスコープの CH1 の設定

(2) 図 3-11 の①CH2 ボタンを押すと, ②H1 の上に Coupling AC と表示されるので, ②H1(Coupling)ボタンを押さない。すると, 画面右側に③Coupling メニューが表示されるので, ④F1(DC)ボタンを押して選択しない。⑤VOLS/DIVつまみを回し, ⑥画面左下の黄文字の表示を「②200mV-」としない。⑦VERTICAL POSITIONつまみを回して黄のラインを画面の上下中央にすると, ⑥画面左下の黄文字の表示は「②200mV- 0.00div」となる。この操作により, CH2 の画面の縦軸も CH1 と同じになる。小さい信号を見るときは, 適宜⑤VOLS/DIVつまみを回して縦軸を拡大しない。

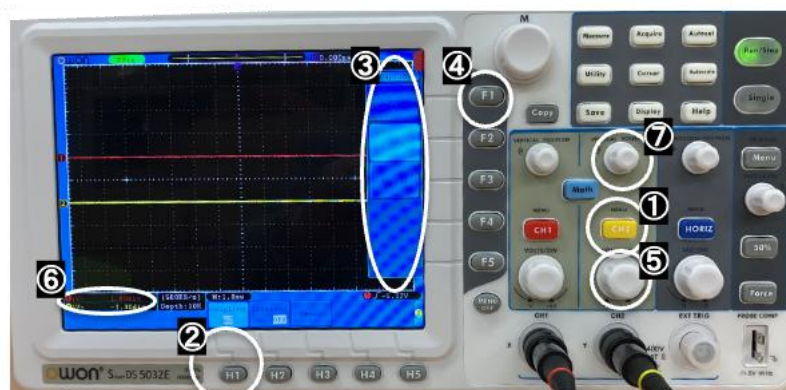


図 3-11. オシロスコープの CH2 の設定

〈おもりの振動変位の検出〉

ホール素子とそのはたらき

図 3-12 は、マウント最上部にある黒いホール素子と向きの異なる脚部を示す。右をホール素子 1，左をホール素子 2 と呼び、マウント上部に番号が印字されている。

ホール素子は、ホール効果（物質中を流れる電流と印加した磁場の両方に垂直な方向に電位差が現れる現象）を利用して磁束密度を検出するセンサーである。図 3-12 のように、素子の向きを示すベクトルを $\vec{n}$ と表すと、ホール素子は、図 3-13 のように、素子が置かれた位置の磁束密度 $\vec{B}$ の $\vec{n}$ 方向成分 B_n を検出する。ホール素子用基板の出力信号電圧 V_{out} は、

$$V_{out} = aB_n \quad (3-5)$$

と表される。ここで、 a は感度を表す。

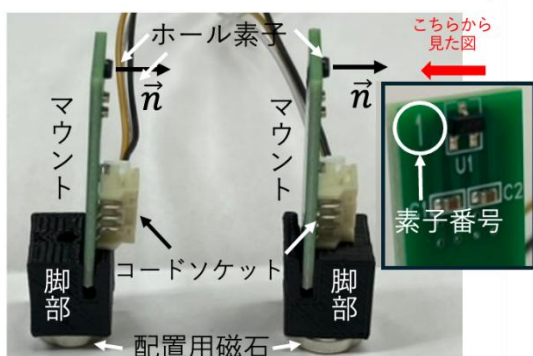


図 3-12. ホール素子とマウント
(右) ホール素子 1, (左) ホール素子 2

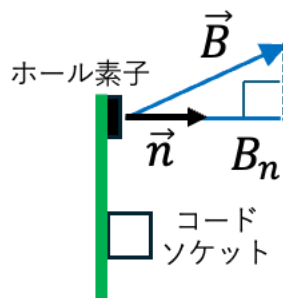


図 3-13. ホール素子が検出する磁束密度

本課題では、ホール素子 1 を使ってコイルの発生する磁場（図 3-14(a)）を検出し、ホール素子 2 を使っておもりの変位（図 3-14(b)）を検出する。駆動用磁石は S 極がコイル側を向くように、位置検出用磁石は各おもりの下に N 極が下を向くように取り付けられている。

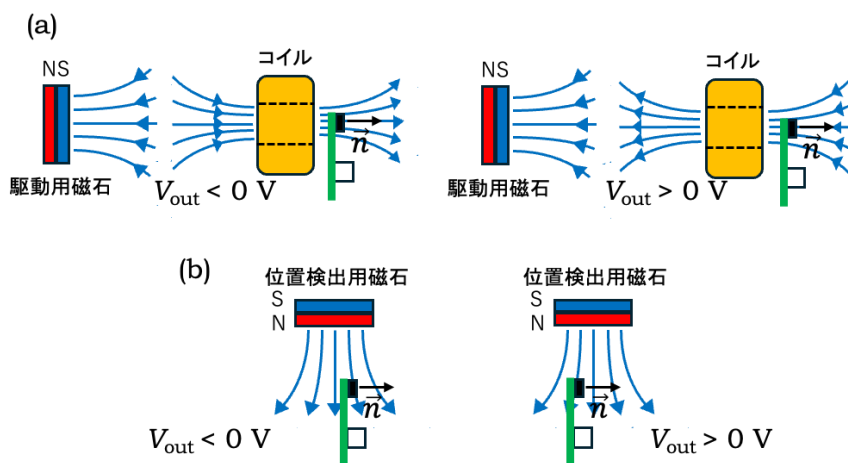


図 3-14. ホール素子を使った(a)コイルの磁場と(b)おもりの変位の検出

青線と矢印は磁束線を表す。図 3-14(a)のように、コイルに流れる電流の方向が変わると磁石との間に左では斥力、右では引力が働く。図 3-14(b)では、磁石の対称軸がホール素子の真上にあると、 B_n はゼロとなるので出力信号電圧は $V_{\text{out}} = 0 \text{ V}$ となるが、磁石（おもり）が $\vec{n}$ と平行に動くと、 $V_{\text{out}} \neq 0 \text{ V}$ となる。本課題で使うホール素子の感度 α は負なので、出力信号電圧の符号は図 3-14 のようになる。つまり、 $V_{\text{out}} > 0 \text{ V}$ のとき、駆動用磁石はコイル方向に力を受けており、おもりはコイル方向に変位している。

＜ホール素子を用いた磁束密度計測システムの配線と手順＞

図 3-15 は、ホール素子を用いた磁束密度計測システムの配線を示す。システムは、ホール素子 1, 2, および 1 個のホール素子用基板と電池ボックス（以下、ホール素子電源と呼ぶ）、さらに観測用のオシロスコープで構成されている。

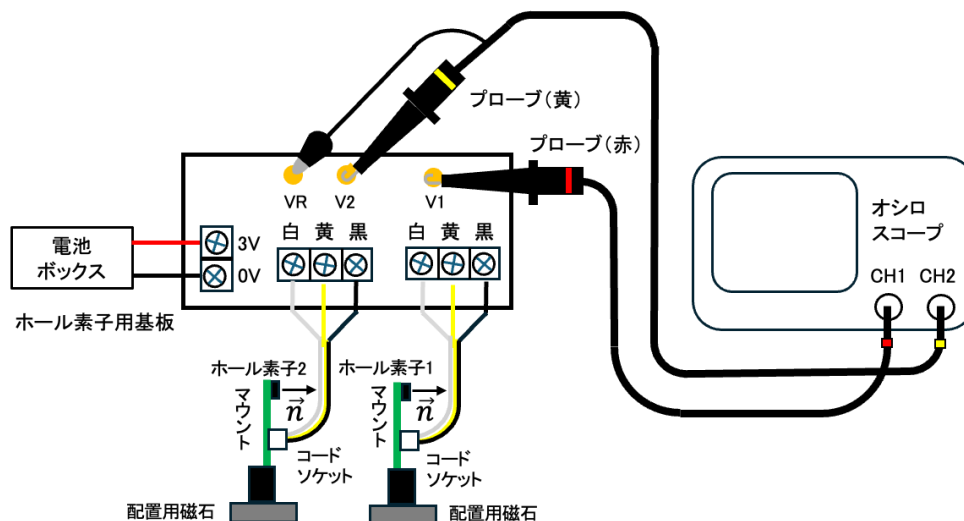


図 3-15. ホール素子を用いた磁束密度計測システムの配線

以下に、配線と確認の手順を示す。

- (1) ホール素子電源を OFF にしてから、電池を入れなさい。
- (2) 図 3-15 のように、プローブ (赤) の先端のフック型クリップをホール素子用基板の V1 端子につなぎなさい。図 3-16 に、フックの出し方を示す。

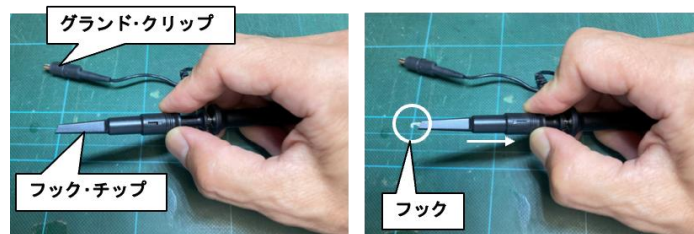


図 3-16. プローブのフックの出し方

プローブ (黄) の先端のフック型クリップをホール素子用基板の V2 端子につなぎなさい

い。プローブ（黄）のグランド・クリップで VR 端子をはさみなさい。プローブ（赤）のグランド・クリップはどこにもつながない。ホール素子 1, 2 の出力信号電圧 V_{out} は、それぞれホール素子用基板の端子 V1, VR 間と端子 V2, VR 間に現われる。このとき、オシロスコープの CH1（赤）と CH2（黄）の出力電圧が画面の上下中央の 0.0 V になっていることを確認しなさい。

- (3) ホール素子とホール素子用基板の近くに磁石がないことを確認してから、ホール素子電源を ON にしなさい。CH1 と CH2 の出力電圧がほぼ画面上下中央のままであることを確認しなさい。
- (4) コイルを向きを変えずに右に動かし、駆動用磁石との間隔を約 25 mm に広げなさい。
- (5) 図 3-17 のように、ホール素子 1 をコイルが発生する磁場を測定する位置と向きに置きなさい。
- (6) 分子模型が動かないように手で軽くつかみながら回路基板の交流直流スイッチを DC にして、駆動回路電源を ON にしなさい。このとき、オシロスコープの CH1 の信号電圧（赤）が**上がる**ことを確認しなさい。

確認ができない場合は監督者に知らせなさい。

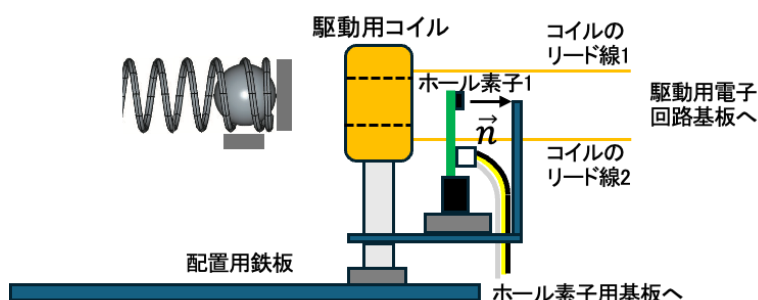


図 3-17. ホール素子を用いた磁束密度計測システムによるコイルの磁場の観測

- (7) 回路基板の交流直流スイッチを AC にしなさい。
- (8) オシロスコープの CH1 の信号電圧（赤）に 0.0 V 付近で変化する矩形波（四角形の波）が観測される。矩形波が正負均等に振れるように、適宜 図 3-10 の⑦VERTIVAL POSION つまみを調節しなさい。これにより、画面上の信号電圧が駆動用磁石にかかる力にほぼ比例する。ホール素子 1 の $\vec{n}$ の向きを変えないように注意しながらコイルとの距離を調整して、矩形波の振れ幅を正・負それぞれ 0.2 V 以上にしなさい。
- (9) 回路基板の COARSE つまみを回してコイルに流す電流の周波数を変えても、オシロスコープ上の CH1 の信号電圧（赤）がいつも画面左右中央のすぐ左で矩形波の低電圧、すぐ右で高電圧に変化することを確認しなさい。もし、波形が左右（時間軸方向）に動くようなら、図 3-18 の①TRIG LEVEL つまみを回すと画面上に現れた水平な赤線が上下に移動し、赤線が矩形波の振れ幅の中に入ると画面が静止する。

静止しない場合は監督者に知らせなさい。

- (10) オシロスコープの横軸（時間軸）の 1 マスの時間幅を調整して、CH1 の信号電圧（赤）の 1~3 周期を表示しなさい。図 3-18 の②画面下の表示が、たとえば「M:20ms」のとき、横軸の 1 マスの時間は 20 ms、つまり 20 ms/DIV である。③SEC/DIV つまみを回すとこれを変えることができる。

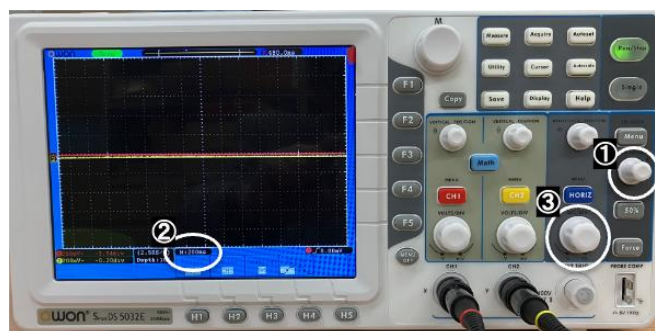


図 3-18. オシロスコープのトリガーレベル，時間軸の設定

＜ホール素子を用いたおもりの変位検出とホール素子 2 の位置合わせの手順＞

図 3-19 は，図 3-17 にホール素子 2 を加えた配置を示す。

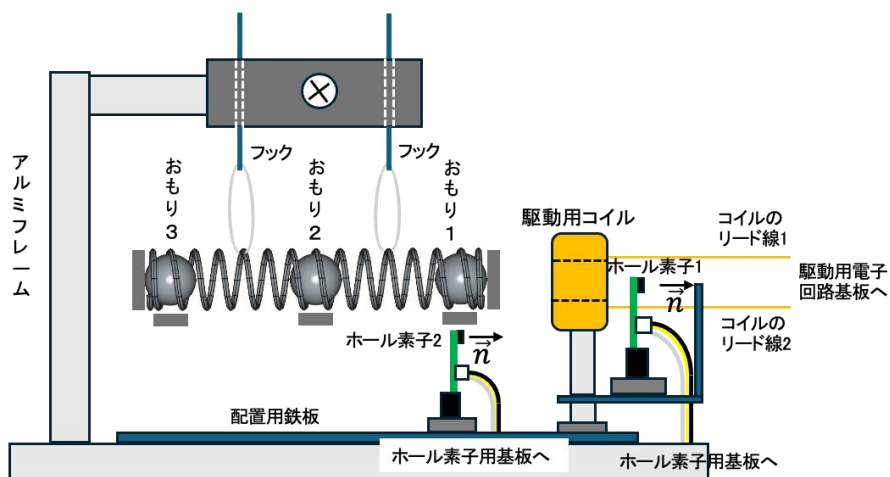


図 3-19. 分子軸方向の振動を調べる配置

- (1) 駆動回路電源を OFF にしなさい。
- (2) 分子模型を分子軸の周りに回転させて，位置測定用磁石が真下に来るようにしなさい。
以下では，常にこの状態を保つようにしなさい。
- (3) ホール素子 2 の $\vec{n}$ を図 3-19 の向きにして，**おもり 3** の位置検出用磁石の**真下**に配置しなさい。このとき，分子軸方向からも見て**真下**になるように配置しなさい。
- (4) 左のフックを手で上下に動かして，ホール素子を取り付けたマウントの端と位置検出用磁石の間隔が約 3 mm になるように調整しなさい。部品の中に直径 (2.6 ± 0.1) mm の竹串があるので利用しなさい。
- (5) ホール素子 2 を**おもり 1** の位置検出用磁石の**真下**に手順(3)と同様にして配置し，右のフックの高さを手順(4)と同様にして調整しなさい。

- (6) 出力電圧がほぼ 0 V (オシロスコープの画面上下中央) になるように、ホール素子 2 の位置を分子軸方向に動かして微調整しなさい。調整の間、ホール素子 2 が分子軸に垂直方向には動かないように、また、 $\vec{n}$ の向きが変わらないように注意しなさい。
- (7) 手で分子模型全体をコイル方向に動かすとオシロスコープの CH2 のホール素子 2 からの出力電圧 (黄) が**上がる**ことを確認しなさい。
- 変化が確認できない場合、あるいは、出力電圧が下がる場合は監督者に知らせなさい。
- (8) 駆動回路電源を ON にし、コイルに流す電流の周波数を問 3-2 で求めたモード A の固有振動数の概略値 f_A' 付近に合わせると、出力電圧 (黄) は正弦波状に変化する。0 V を中心に変動するように、ホール素子 2 の位置を分子軸方向に動かして微調整しなさい。調整の間、ホール素子 2 が分子軸に垂直方向には動かないように、また、 $\vec{n}$ の向きが変わらないように注意しなさい。今後手順(8)を**位置調整**と呼ぶ。
- (9) 後で同じ位置にホール素子 2 を置くときの目印として、ホール素子 2 の位置を鉄板に油性ペンでマークしなさい。

【課題 3-3 : モード A の共振付近でのふるまい】

本課題では、コイルに流す電流の周波数 (駆動周波数) を共振周波数付近で変え、おもりの振幅の変化、および、変位が駆動力より時間的に遅れることを調べる。

駆動周波数をモード A の固有振動数付近で変えながらおもり 1 の位置を示す信号電圧 V_{out} をオシロスコープで観察すると、その振幅は共振周波数 f_A で最大となり、その前後で減少する。このようすを表すグラフを共振曲線という。共振曲線が最大値の半分の値をとる周波数は、最大値の低周波数側に $f_{-1/2}$ 、高周波数側に $f_{+1/2}$ と 2 つある。本課題では、いくつかの駆動周波数で振幅を測定して共振曲線を描き、 f_A , $f_{-1/2}$, $f_{+1/2}$ を求める。

問 3-3a

駆動周波数を変えながらおもり 1 の位置信号電圧 V_{out} をオシロスコープで観察し、その振幅が最大になる周波数 f_{peak} を見つけ、**解答用紙 8** の表に記録しなさい。

注意 1 共振の周波数幅は非常に狭く、また、駆動周波数が共振周波数と一致しても振幅は 5 s 程度かけてゆっくり増大する。したがって、**駆動周波数を速く変えと見つからない**。回路基板の COARSE つまみを回して問 3-2 で求めた f_A' に合わせ、その後、FINE つまみをゆっくり回して探索するとよい。

注意 2 駆動力が強すぎると、共振周波数付近で余分な振動モード (吊りひもによる振り子振動、回転振動等) やヒステリシス (振幅がその時の駆動周波数だけでなく駆動周波数の変化の履歴に依存する現象) が現れる。そのときは、 $\vec{n}$ の向きを変えずにコイルを分子模型から離しなさい。

注意 3 ここで求めた f_{peak} が後に共振曲線から求める f_A と一致しなくても、測定をやり直さなくてよい。

問 3-3b

オシロスコープの時間軸を調整して(図 3-18 の②SEC/DIV つまみ) 信号の 1~3 周期を表示し、以下に示す<振幅の測定手順>に従っておもり 1 の位置信号電圧の振幅 $V_{\text{amp}} = (V_{\text{max}} - V_{\text{min}})/2$ を測定し、解答用紙 8 の表に記録しなさい。ここで、 V_{max} と V_{min} はそれぞれ位置信号電圧の 1 周期内の最大値と最小値である。

<振幅の測定手順>

- (1) 駆動周波数を設定してから 5 s 程度待つて、信号が定常状態に達してから、図 3-20 の②Run/Stop ボタンを押してオシロスコープ上の波形を静止させる。このとき、Run/Stop ボタンのバックライトは緑から赤に変わる。
- (2) 図 3-20 の①VERTICAL POSITION つまみを回しておもり 1 の信号電圧の変化の中心をオシロスコープの画面上下中央に合わせ、 V_{max} を枠線のマスの数で読み、V/DIV の設定から電圧に直せば V_{amp} が得られる。
- (3) 再度②Run/Stop ボタンを押すと、Run モードに戻る。

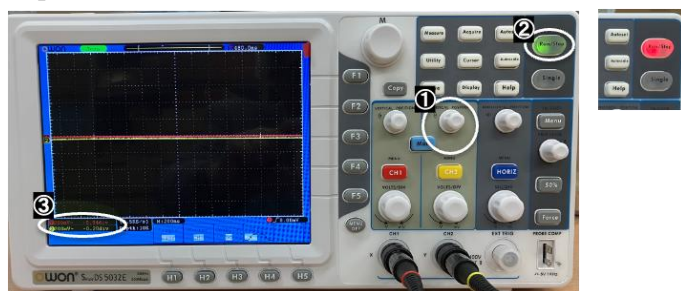


図 3-20. オシロスコープの VERTICAL POSITION つまみと Run/Stop ボタン

問 3-3c

おもり 1 の変位が駆動力より時間的に遅れることを観測する。 $f = f_{\text{peak}}$ において、 V_{CH1} を破線-----, V_{CH2} を実線—————で解答用紙 10 の同じグラフに描き写しなさい。ここで、 V_{CH1} , V_{CH2} は CH1 と CH2 の信号電圧を表す。グラフの枠線はオシロスコープと同じである。 V_{CH2} のグラフは、極大点・極小点・横軸との交点を明示し、線でつなぎなさい。途中は概形で構わない。なお、 V_{CH1} はおもり 1 にかかるコイル方向の力にほぼ比例し、 V_{CH2} はおもり 1 のコイル方向への変位にほぼ比例している。

問 3-3d

$f < f_{\text{peak}}$ で振幅がほぼ $V_{\text{peak}}/2$ となる駆動周波数に設定し、その周波数 f_{half} と振幅 V_{amp} を解答用紙 8 の表に記録しなさい。<振幅の測定手順>に従いなさい。ここで、 V_{peak} は $f = f_{\text{peak}}$ での振幅 V_{amp} を表す。

注意 ここで求めた f_{half} が後で共振曲線から求める $f_{-1/2}$ と一致しなくても、測定をやり直さなくてよい。

問 3-3e

$f = f_{\text{half}}$ における V_{CH2} を一点鎖線 $\cdots$ で解答用紙 10 の問 3-3c と同じグラフに描き写しなさい。問 3-3c の描き方と同様にしなさい。

問 3-3f

$f > f_{\text{peak}}$ で振幅がほぼ $V_{\text{peak}}/2$ となる駆動周波数に設定し、その周波数 f_{half} と振幅 V_{amp} を解答用紙 8 の表に記録しなさい。〈振幅の測定手順〉に従いなさい。

注意 ここで求めた f_{half} が後で共振曲線から求める $f_{+1/2}$ と一致しなくても、測定をやり直さなくてよい。

問 3-3g

$f = f_{\text{half}}$ における V_{CH2} を二点鎖線 $\cdots$ で解答用紙 10 の問 3-3c, e と同じグラフに描き写しなさい。問 3-3c の描き方と同様にしなさい。

問 3-3h

$f = f_{\text{peak}}, f_{\text{half}}, f_{+1/2}$ 以外の測定点を適宜加え、解答用紙 8 の表に記録しなさい。

問 3-3i

問 3-3h で作成した表から、解答用紙 9 の方眼紙に共振曲線を描きなさい。

問 3-3j

問 3-3i で作成した共振曲線から、 $f_A, f_{-1/2}, f_{+1/2}$ を求めなさい。求め方も書きなさい。

問 3-3k

問 3-3c, e, g で描いたグラフの下にある「コイル方向へ力が働く時間」枠と「コイル方向へ動く時間」枠に、当てはまる時間範囲を↔で示しなさい。

問 3-3l

$f = f_A$ のとき、励起エネルギーは効率よくコイルから分子模型に移る。その理由を問 3-3k の結果に触れながら説明しなさい。なお、問 3-3c の $f = f_{\text{peak}}$ で描いた力のグラフを $f = f_A$ のときのグラフと考えてよい。

注意 x 方向の力 F を受けている物体が時間 Δt の間に Δx だけ変位すると、その間に力 F が物体にした「仕事率」は $P = F \frac{\Delta x}{\Delta t}$ であり、これが物体に移った単位時間あたりのエネルギーを表す。

【課題 3-4：モード A のおもりの変位のしかた】

本課題では、モード A に共振した状態で、各おもりは振動の 1 周期の間にどのように変位しているか、各おもりの位置信号から調べる。

問 3-4a

モード A に共振した状態で、おもり 1 の位置信号電圧 $V_1(t)$ をオシロスコープの画面に表示しなさい。画面左右中央を時刻 $t = 0$ s, 振動の周期を $T_A = f_A^{-1}$ として, $-\frac{1}{2}T_A \leq t < \frac{1}{2}T_A$ の 1 周期内で $V_1(t)$ が最大になる時刻 $t_{1,\max}$ とそのときの $V_1(t_{1,\max})$ を記録しなさい。〈振幅の測定手順〉に従いなさい。

〈実験の手順〉

- (1) ホール素子 2 を, $\vec{n}$ の向きを変えずにおもり 3 の位置検出用磁石の**真下**に移しなさい。
- (2) オシロスコープの CH2 の縦軸の設定を, 図 3-11 の⑤VOLS/DIV つまみと⑦VERTICAL POSITION つまみを回して, ⑥の表示が「②200mV- 0.00div」となるようにしなさい。
- (3) 分子模型がモード A に共振した状態で, ホール素子 2 の**位置調整**をしなさい。
- (4) 目印として, ホール素子 2 の位置を鉄板に油性ペンでマークしなさい。

問 3-4b

モード A に共振した状態を保ったまま, おもり 3 の位置信号電圧 $V_3(t)$ の時刻 $t_{1,\max}$ での値 $V_3(t_{1,\max})$ を記録しなさい。〈振幅の測定手順〉に従いなさい。解答欄の位置に注意しなさい。

- (5) ホール素子 2 を, $\vec{n}$ の向きを変えずにおもり 2 の位置検出用磁石の**真下**に移しなさい。
- (6) オシロスコープの CH2 の縦軸の設定を, 図 3-11 の⑤VOLS/DIV つまみと⑦VERTICAL POSITION つまみを回して, ⑥の表示が「②200mV- 0.00div」となるようにしなさい。
- (7) 共振した状態を保ったまま, ホール素子 2 の**位置調整**をしなさい。
- (8) 目印として, ホール素子 2 の位置を鉄板に油性ペンでマークしなさい。

問 3-4c

モード A に共振した状態を保ったまま, おもり 2 の位置信号電圧 $V_2(t)$ の時刻 $t_{1,\max}$ での値 $V_2(t_{1,\max})$ を記録しなさい。〈振幅の測定手順〉に従いなさい。解答欄の位置に注意しなさい。

問 3-4d

時刻 $t_{1,\max}$ における各おもりの位置を、問 3-4a から問 3-4c で作成した表から読み取り、解答用紙の模式図に描きなさい。なお、各おもりは分子軸方向にのみ変位するとし、解答用紙の破線円はつり合いの位置にある各おもりを表す。

注意 ここでは、各おもりの変位の方向と相対的な大きさがわかるように描きなさい。

【課題 3-5：モード B の共振周波数とおもりの変位のしかた】

本課題では、モード B について共振周波数とおもりの変位のしかたを調べる。

＜実験の手順＞

- (1) コイルの向きを変えずに、コイルと分子模型の間隔を約 3 mm に狭めなさい。
- (2) オシロスコープの CH1（赤）に表示される矩形波が時間軸方向に動くときは、図 3-18 の③TRIG LEVEL つまみを回して静止させなさい。

問 3-5a

CH2（黄）のおもり 2 の位置信号電圧 $V_2(t)$ をオシロスコープの画面で観測しながら、問 3-1 で求めた $f_{B,\text{cal}}$ 付近で駆動周波数 f を変えて、振幅が最大になる共振周波数 f_B を探みなさい。共振周波数は $f_{B,\text{cal}}$ の前後 15 % 程度の範囲内にある。ここでは、共振曲線を描かずに f_B を求める。

問 3-5b

オシロスコープの画面左右中央を時刻 $t = 0$ s、振動の周期を $T_B = f_B^{-1}$ として、 $-\frac{1}{2}T_B \leq t < \frac{1}{2}T_B$ の 1 周期内で $V_2(t)$ が最大になる時刻 $t_{2,\max}$ とそのときの $V_2(t_{2,\max})$ を記録しなさい。**＜振幅の測定手順＞**に従いなさい。解答欄の位置に注意しなさい。

問 3-5c

$f = f_B$ で時間変化するおもり 1、3 のそれぞれの位置信号電圧 $V_1(t)$ と $V_3(t)$ をオシロスコープに表示し、問 3-5b で求めた時刻 $t_{2,\max}$ における各おもりの位置信号電圧 $V_1(t_{2,\max})$ と $V_3(t_{2,\max})$ を記録しなさい。このとき、鉄板に描いておいたマークを利用し、**＜振幅の測定手順＞**に従いなさい。解答欄の位置に注意しなさい。

問 3-5d

問 3-5b、c で作成した表から各おもりの位置を読み取り、解答用紙の模式図に描きなさい。なお、各おもりは分子軸方向にのみ変位するとし、解答用紙の破線円はつり合いの位置にある各おもりを表す。問 3-4d の**注意**にも注意しなさい。

【課題 3-6：モード C の共振周波数とおもりの変位のしかた】

本課題では、分子軸と直交する方向に各おもりが振動するモード C について共振周波数とおもりの変位のしかたを調べる。

＜実験の手順＞

- (1) 図 3-21 は、分子模型のモード C を励起するコイルの向きを示している。図のように、ホール素子 1 がコイルの後ろに隠れる向き（上から見て反時計回り）にコイルを 90° 回し、コイルを分子軸上で分子模型との間隔が約 25 mm になるように配置しなさい。コイルの外側を通る磁束線により、分子軸に垂直な力がおもり 1 に働く。
- (2) オシロスコープの CH1（赤）に表示される矩形波が時間軸方向に動くときは、図 3-18 の③TRIG LEVEL つまみを回して静止させなさい。

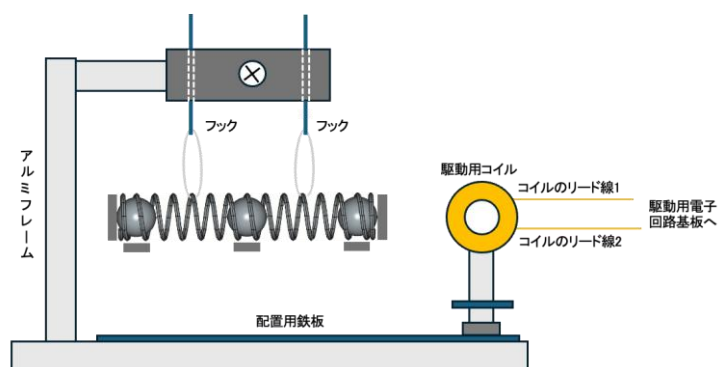


図 3-21. モード C を励起するコイルの配置

問 3-6a

モード C の共振周波数とおもりの変位のしかたを調べることができるように、ここまでの実験を振り返って、ホール素子 2 の位置と $\vec{n}$ の向き、オシロスコープの使い方等を考え、実験配置・手順を、モード A とモード B の場合との異同がわかるように説明しなさい。図を使ってもよい。また、問 3-6b, c を解答するために記録したデータもここに書きなさい。

問 3-6b

問 3-1 で求めた $f_{C,cal}$ 付近で駆動周波数 f を変えて、振幅が最大になる共振周波数 f_C を探しなさい。共振周波数は $f_{C,cal}$ の前後 15 % 程度の範囲内にある。

問 3-6c

$f = f_C$ で時間変化する各おもりの変位のしかたを調べ、いずれかのおもりの位置信号電圧が最大となる時刻における変位の様子を解答用紙の模式図に分子模型を上から見下ろした図を描きなさい。なお、各おもりは分子軸に直交した方向にのみ変位するとし、解答用紙の破線円はつり合いの位置にある各おもりを表す。解答用紙の「 $t_{\max}$ 」の下付き下線部にはおもりの番号を書きなさい。問 3-4d の注意にも注意しなさい。

【課題 3-7：赤外線による CO₂ 分子の振動励起】

本課題では分子模型を磁場で駆動したが、大気中の分子は赤外線の電場によって駆動される。CO₂ 分子の電子分布は O 原子周辺に偏るため、O 原子は－，C 原子は＋にわずかに帯電しているとみなすことができる。ここでは、外から固有振動数に一致する**一様な振動電場**が作用したときに、それぞれの原子が受ける力を考え、各モードが励起されるかどうか検討しよう。励起されるモードは赤外線とエネルギーを交換するので温室効果の原因になる。

注意 本課題ではコイルに近いおもりが主に力を受けるが、赤外線では CO₂ 分子のすべての原子が同じ振動電場を受ける。

問 3-7

CO₂ 分子のモード A, B, C は赤外線で励起されるか否か。当てはまる方を○で囲みなさい。また、その理由を簡単に書きなさい。

