

## 質量測定 (10 点)

この実験問題では、質量の測定を試みる。

### 実験のセットアップ

以下は部品のリストである (図 1)。部品数が 2 つ以上の場合のみ、[] 内に部品数を示している。

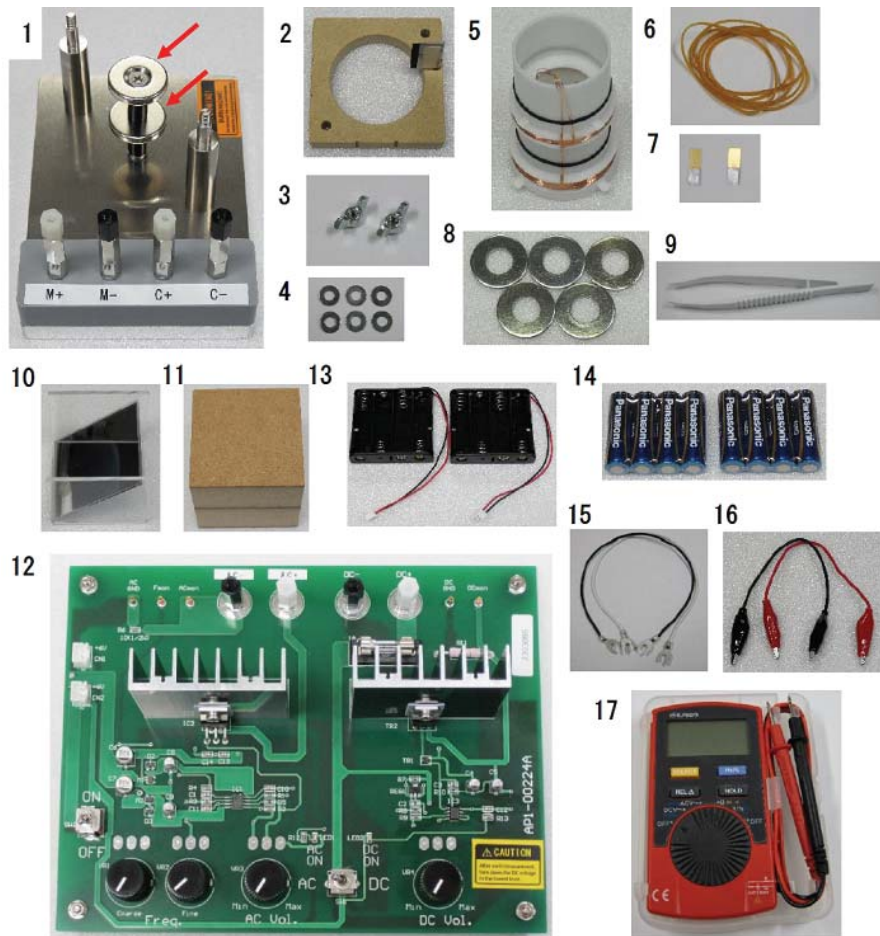


図 1：実験装置のセット。

1. 取り付け台：

**注：**台上にある磁石対は、その間の中央付近で高さ  $\pm 3$  mm の範囲では高さに依存しない一様な放射状の磁場を形成する。

2. (振動子の) 固定板 (定規付き)

3. 蝶ネジ [2]：

**注：**2 と 3 は、提供される箱に入っている 1 から取り外して使用せよ。

4. 詰め金具 (ワッシャー) [6]

5. 円筒振動子

6. 輪ゴム [6]
7. マーカー [2]
8. おもり [5]
9. ピンセット
10. 鏡
11. 高さ調整用の台
12. 電源 (PS) :

トグルスイッチで DC または AC モードに切り替える。

DC モードでは定電流電源として機能する。"DC Vol" と表示されたつまみを回して電流を調整できる。電流の大きさは、"DCmon" と "DC GND" 間の電圧から変換係数 1.00 A/V を用いて求められる。

AC モードでは、固定振幅の電圧源として機能する。"AC Vol" と表示されたつまみを回して電圧を調整できる。AC の電流値は、"ACmon" と "AC GND" 間の AC 電圧から変換係数 0.106 A/V を用いて求められる。周波数 (Freq.) は、制御用つまみ "Coarse" および "Fine" を用いて調整できる。

13. 電池ボックス [2]
14. 電池 [8]
15. U 字型圧着端子ワイヤー [2]
16. ワニ口クリップワイヤー [2]
17. デジタルマルチメーター (DMM) :

つまみを回して、"DCV"、"ACV"、"Hz" の中から適切な測定モードを選択できる。ただし、AC 電圧の表示値は二乗平均平方根 (RMS) 値、すなわち実効値を示すことに注意すること。

### 実験系のモデル化

図 2 は、実験のセットアップを簡単にモデル化したものである。これは本質的にはバネ振動に駆動される振動子である。

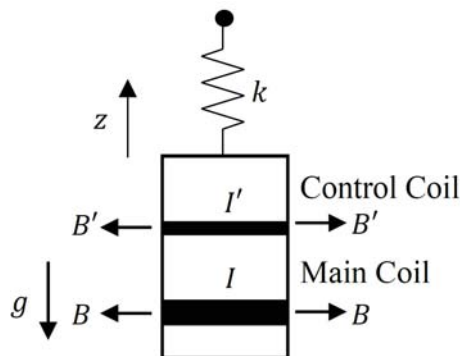


図 2：調和振動子のモデル。

関連するパラメーターは以下の通りである：

- $M$ ：(円筒) 振動子の質量
- $m$ ：おもり 1 つあたりの質量

- $N$ ：おもりの数
- $g$ ：重力加速度の大きさ
- $k$ ：上下運動に関わる実効的なバネ定数
- $z$ ：振動子の高さ（または変位）
- $z_e$ ：電磁気力なしでつりあいが保たれている際の振動子の高さ。
- $B(B')$ ：主要（制御）コイルにかかる磁場
- $L(L')$ ：主要（制御）コイルの導線の長さ。
- $I(I')$ ：主要（制御）コイルに流れる電流
- $\alpha$ ：抵抗力を表す正の係数

運動方程式は次式で与えられる。

$$(M + Nm) \frac{d^2 z}{dt^2} = -(M + Nm)g - k(z - z_e) + BLI + B'L'I' - \alpha \frac{dz}{dt}. \quad (1)$$

## 振動子の取り付け

1. 取り付け台から固定板を取り除き、4つのゴムバンドを格子状に巻きつける（図3(a)参照）。
2. 円筒形振動子を輪ゴムが交差してできた正方形の隙間に定規側から挿入し、定規の反対側にリード線を置く（図3(b)）。
3. 振動子は、4つの輪ゴムと8つの小さなフック（図3(c)の赤丸）で固定板にぶら下がるように設計されている。適切に実装された場合、横から見て1つの輪ゴムは固定板の高さより上と下の2つのフックを通る端の切れたひし形を形成する。  
**注：**この実験では、輪ゴムによる実効的な力はフックの法則に従うと仮定できる。
4. 2つの蝶ネジを対角線状に配置し固定板を固定する。定規は、バインディングポスト（コネクタ端子；M+、C+等）側ではない上部に直立するようにする（図3(d)）。
5. 振動子を垂直に立てる。振動子の軸は磁石対と同じになるよう垂直に合わせる。
6. 主要コイルは静止している際に二つの磁石の真ん中付近に近くてはならない。そのためには下側にある磁石の上面と振動子の下部との距離が3～5mmであることを確かめれば良い（図3(e)）。もし低い場合は、柱と固定板の間に詰め金具（ワッシャー）を入れよ（図3(f)の赤矢印）。もし高い場合は、磁石のついた柱を回して外し、ポストの下に詰め金具（ワッシャー）を入れよ（図3(f)の黄矢印）。
7. マーカーに付いている両面テープの保護紙を剥がす（図4(a)）。振動子の高さを測るために、振動子の小さな突起にマーカーを接着する（図4(b)）。
8. 高さ調整用の台に鏡をセットする（図4(c)）。鏡越しに上からマーカーがはっきりと見えるようにする（図4(d)の赤丸）。

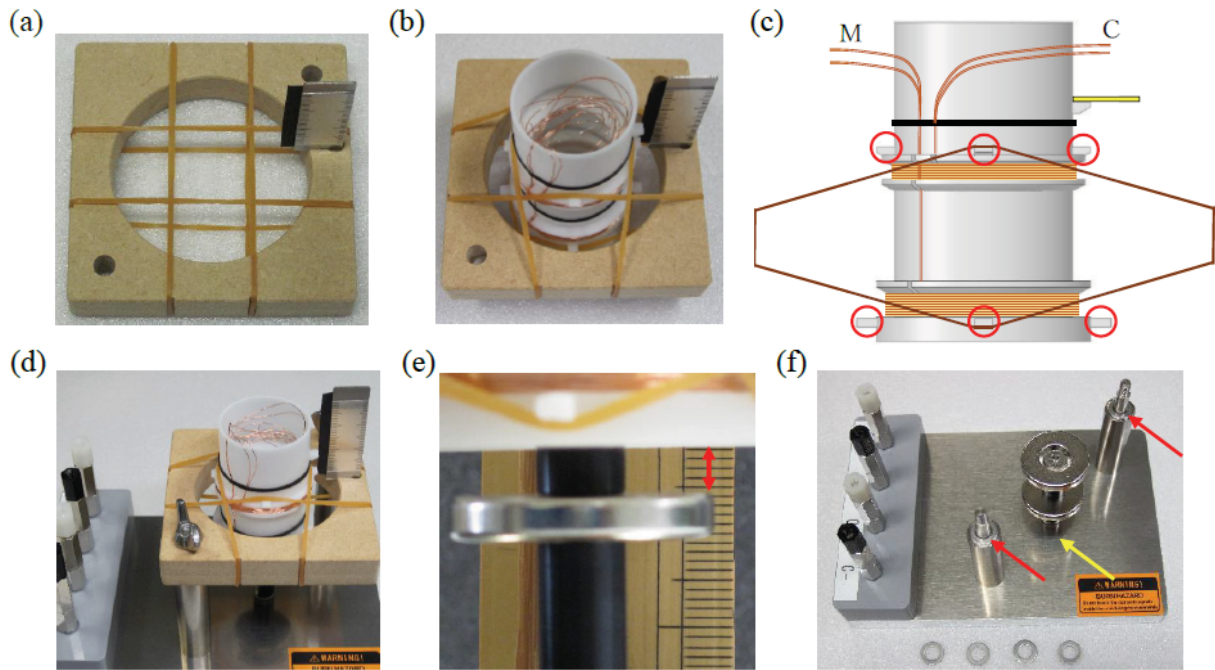


図 3：振動子の取り付け。

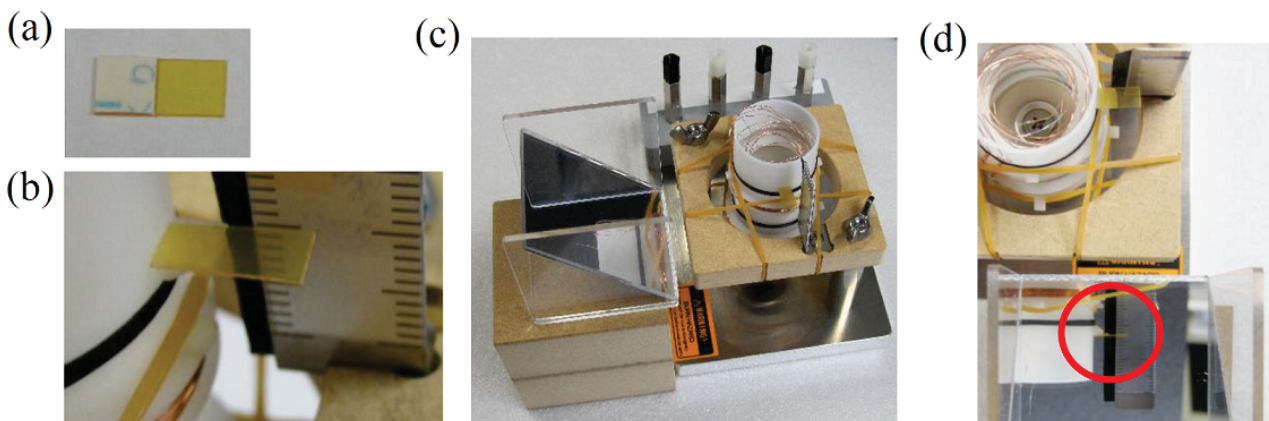
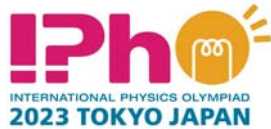


図 4：マーカーと鏡の取り付け。

## 配線

1. 主要コイル (M) と制御コイル (C) (図 3(c)) につながる正しい 2 本のワイヤーを、振動子の中 (図 3(b)) から探し出し、静かに引き出す。端のエナメルが剥がれているかを確認すること。
2. バインディングポスト M+ と M- のネジを緩め、隙間ができるようにする。配線には下の隙間を使う (図 5(a),(b))。極性の確認は後ほど行う。
3. C+ と C- と書かれたバインディングポストも同様に配線する (極性はどちらでも構わない)。
4. 電池を電池ホルダーに入れ、PS (CN1、CN2) と確実につなげる (図 5(c))。

## Experiment



# Q1-5

Japanese (Japan)

5. バインディングポスト M+ と M- を PS の DC 出力 (DC+ と DC-) に U 字型圧着端子線で接続する。
6. DC をオンにして PS の電源を入れる。
7. ”DC Vol” つまみを回して電流を調整する。振動子が 2 mm 以上、上方に動くかどうか確認する。下方に動く場合は、ワイヤーを交換して極性を反転させ、再度試す。

**注：コイルや磁石は熱くなっているので注意すること。各ステップの最後には DC 出力を最小にすること。**

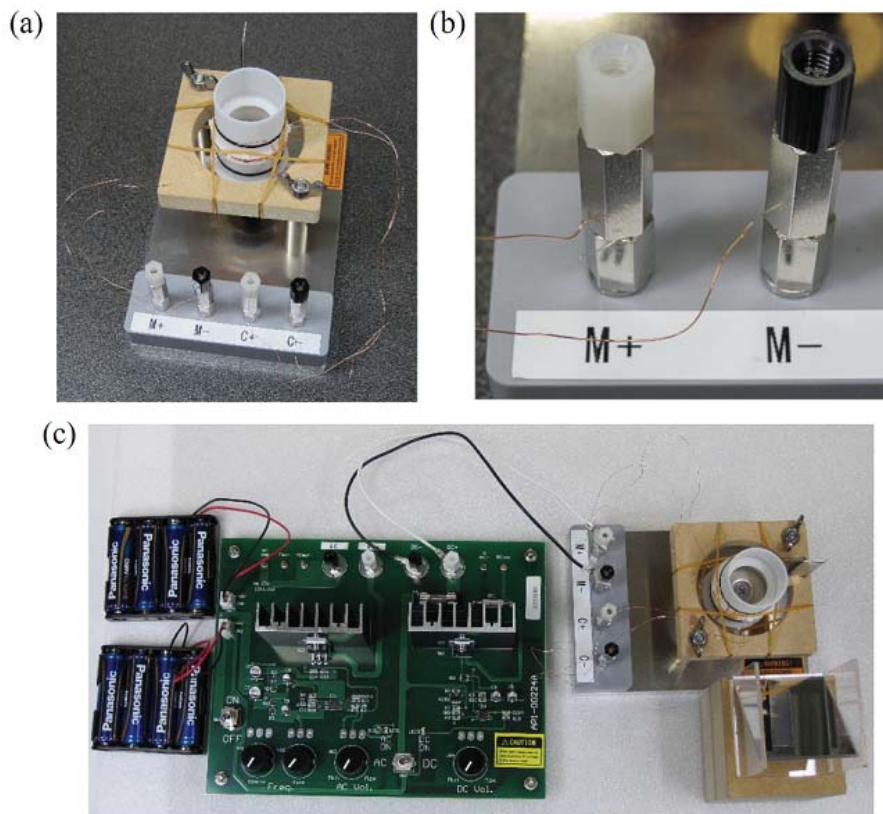


図 5：(a),(b) バインディングポストの配線、(c) PS と電源を含むセットアップ全体の配線。

### 振動子のテスト

1. バインディングポスト M+ と M- を圧着端子線で AC 出力 (AC+ と AC-) に接続する。
2. AC 電源を入れ、PS の電源を入れる。
3. ”AC Vol” と表示されたつまみを、最小値から時計回りに 1/4 回転させる。制御用つまみ ”Coarse” で周波数を調整し、振動させ始める。
4. AC 出力の電圧と周波数を調整し、振幅がおおよそ  $A = 3 \text{ mm}$  になるように振動させる (図 6)。振動が不安定な場合は、振動子のセッティングを適宜調整せよ。
5. AC 出力をバインディングポスト M+ と M- から外し、C+ と C- に接続する。
6. PS の電源を入れ、再び振動させ始める。

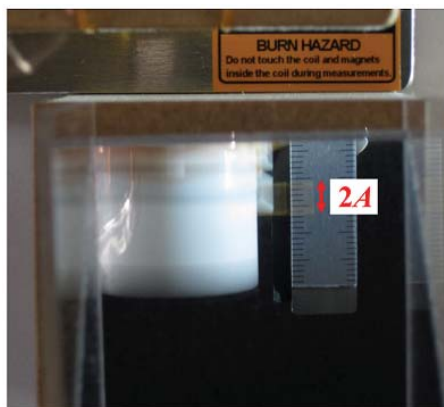


図 6：鏡越しに見た振動の挙動。

## パート A. フックの法則と電磁気力 (2.4 点)

**A.1** N 極を向かい合わせにした 2 つの円盤状である同一磁石による磁力線を解答用紙に描け。 0.4 pt

**A.2** M+ と M- を DC 出力に接続する。さらにワニ口クリップ線を使用して、DMM と DC 電流の読み出し用端子を繋げる (図 7)。 0.6 pt  
 おもりがない、つまり  $N = 0$  であり、DC 電流がゼロである際の振動子の高さ  $z$  を読み取り、表 A.2 に記録せよ。  
 円筒の内壁についている円形の出っ張りにおもり 1 個 ( $N = 1$ ) を置き、振動子が静止する高さ  $z$  を記録する。  
 振動子をおもりのない状況で読み取った場所まで戻すために必要な主要コイルに流す DC 電流  $I$  の値を求めよ。  
 $N$  を 5 まで増加させながら測定を繰り返し、表 A.2 に記入せよ。

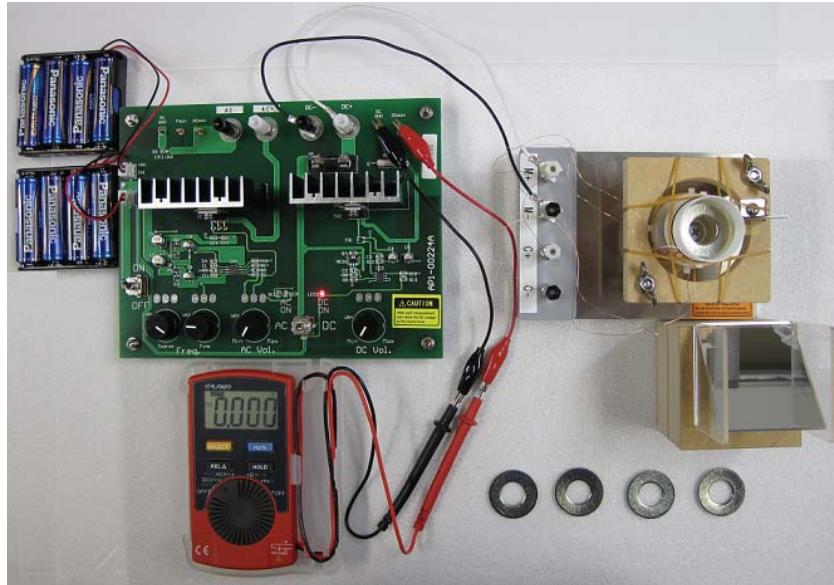


図7：DMMが接続されたテスト配線。右はおもりを載せた振動子。

**A.3** おもりの個数  $N$  と高さ  $z$  の関係を示すグラフを描け。また、グラフから傾き  $a = \frac{\Delta z}{\Delta N}$  とその不確かさを求めよ。 0.7 pt

**A.4** おもりの数  $N$  と電流  $I$  の関係を示すグラフを描け。また、 $b = \frac{I}{N}$  として定義される  $b$  の値とその不確かさをグラフから求めよ。 0.7 pt

## パート B. 誘導起電力 (3.0 ポイント)

**B.1** 周波数  $f$  の交流電流が、おもり無しで制御コイルに印加されているとする。振動子の高さが時間とともに正弦波状に変化することを考えると、 0.2 pt

$$z - z_0 = A \sin(2\pi ft) \quad (2)$$

が得られる。ここで、 $z_0$  は力がつりあった際の高さ、 $A$  は振動の振幅である。主要コイルにおける誘導起電力の振幅  $V$  の式を書き下せ。

**B.2** C+ と C- を AC 出力に接続する。周波数を読み取るために DMM を "Fmon" と "AC GND" に接続する。AC 周波数と出力電圧の両方を調整し、適切な振幅で安定に振動をさせる。周波数  $f_B$  を測定し、解答用紙に記録せよ。バインディングポスト M+ と M- を DMM に繋げる。周波数を固定したまま、出力電圧を変化させ、発振振幅  $A$  と主要コイルに誘起される交流電圧  $V'$  ( $V' = V/\sqrt{2}$ ) を測定し、表 B.2 に適宜記入せよ。 0.5 pt

**B.3** 振幅  $A$  と電圧  $V'$  の関係を示すグラフを描け。また、 $c = \frac{V'}{A}$  として定義される  $c$  の値とその不確かさをグラフから求めよ。 0.7 pt

**B.4** **B.3**の結果を用いて、 $BL$ とその不確かさを計算せよ。 0.4 pt

**B.5** **A.3**、**A.4**、**B.4**の結果を用いて、 $m$ と $k$ の値を計算し、その不確かさを評価せよ。 1.2 pt  
適宜、重力加速度の大きさ  $g = 9.80 \text{ m/s}^2$  を使用せよ。

### パート C. 質量依存の共振周波数 (2.3 ポイント)

以下の実験では、主要コイルを使って振動子を駆動する。接続は適切に変更せよ。

**C.1**  $N$ 個のおもりが乗った振動子の共振周波数  $f$  の式を書け。運動中のバネ定数  $k'$  ( $k$ とは異なる) を用いよ。 0.2 pt

**C.2** 主要コイルと交流電源を繋げて振動子を駆動する。異なるおもりの数、 $N = 0$  から 5 について、共振周波数  $f$  を測定し、その値を表 **C.2** に書き込め。おもりが跳ねないように注意せよ。 0.5 pt

**C.3** **C.2**の結果を用いてグラフを描き、 $\frac{M}{k'}$  と  $\frac{m}{k'}$  を求めよ。得られた値を解答用紙に記入せよ。追加の物理量を計算する必要がある場合は、表 **C.2** の空欄に記入せよ。 1.0 pt

**C.4**  $\frac{M}{m}$  の値はいくらか？ **B.5**の結果を用いて  $M$  と  $k'$  を計算せよ。 0.6 pt

### パート D. 共振特性 (2.3 点)

振幅  $F_{AC}$ 、振動数  $f$  の周期的な力がおもりなしで振動子に作用する場合、 $A$  の振動振幅は以下のような共振特性によってうまく記述される：

$$A(f) = \frac{F_{AC}}{8\pi^2 M f_0} \cdot \frac{1}{\sqrt{(f - f_0)^2 + (\Delta f)^2}}. \quad (3)$$

ここで、 $\Delta f = \frac{\alpha}{4\pi M}$  である。この式は、 $|f - f_0| \ll f_0$  のような周波数範囲でのみ成立する。

このパートでは、式 (3) が常に成り立つと仮定して、共振特性を用いて振動子の質量  $M$  を求める。

**D.1** 主要コイルに AC 電源を繋げて振動子を駆動させる。周波数と出力電圧を調節して、適切な振幅の共振を発生させる。 ”ACmon” と ”AC GND” 間の交流電圧  $V'_{AC}$  を解答用紙に記録せよ。**B.4**の結果と変換係数  $0.106 \text{ A/V}$  を用いて、振動子に作用する周期的な電磁気力の振幅  $F_{AC}$  を計算せよ。 0.4 pt

**D.2** 周波数  $f$  を変化させたときの振動の振幅  $A$  を表 **D.2** に記録せよ。印加される力の振幅  $F_{AC}$  は、測定を通して一定に保たなければならない。周波数  $f$  と振幅  $A$  の関係を示すグラフを描け。 0.9 pt



Experiment



# Q1-9

Japanese (Japan)

D.3 D.1 と D.2 の結果を用いて、 $M$  を求めよ。

1.0 pt