

物理チャレンジ 2007

実験問題

2007年7月31日(火)

諸注意・実験器具確認 8:25 ~ 8:30

実験問題にチャレンジ 8:30 ~ 13:20

実験器具後片づけ 13:20 ~ 13:30

<注意事項>

1. 実験器具の確認や注意事項の伝達，チャレンジの開始と終了などについては，チャレンジの監督者の指示に従うこと。
2. 実験問題は実験問題1，実験問題2の2つある。どの問題からチャレンジしても良いが，時間の配分をよく考えてチャレンジすること。
3. すべての解答用紙（両面）の表面および封筒に，第2チャレンジ番号と氏名を必ず記入すること。
4. 机上に配布されている白紙をデータ記録用紙として使用し，提出した解答用紙を後日再現できるように，持ち帰ること。
5. 持参した筆記用具と，与えられた実験装置，電卓以外は使用してはならない。
6. 実験中に，測定装置に不具合が生じた場合や実験の部品を紛失した場合は，監督者に申し出ること。
7. チャレンジ開始から12:00まではチャレンジを終了することはできない。
8. チャレンジ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，質問があるとき，チャレンジを終了するときは，手をあげて監督者に知らせること。
9. 終了の合図があった場合は，提出する解答用紙に第2チャレンジ番号と氏名が記入されていることを確認の上，これらをまとめて封筒の中に入れ，机上に置くこと。
10. チャレンジ終了後，実験装置をもと通りに机上にまとめること。問題冊子とデータ記録用紙は持ち帰ること。また，机に貼られたチャレンジ番号と名前が書かれた紙をはがすこと。

実験問題

はじめに

音叉や弦などのように一定の振動周期を持つ物体（振動体）に、同じ周期で振動している別の振動体（たとえば、スピーカ）を近づけると、音叉や弦が振動を始める現象が観察される。これは、《共振現象》と呼ばれる物理現象の1例である。この《共振現象》では、2つの振動体が互いに相互作用して、それぞれの振動の様子が緩やかに時間変化する。《共振現象》は、我々の身の回りにもいろいろなかたちで存在する。例えば、ブランコをこいだり、つり鐘を指先一本で揺らしたりするとき、我々は巧まずしてその原理を利用している。

物理チャレンジ2007の実験問題のテーマは、このような《共振現象》の解明である。良い実験を行って、良い測定結果を出し、実験精度を考慮した良い解答が書かれることを期待する。

実験問題 1

実験の目的：

両端を固定された弦は、弦の長さ、弦の線密度、および弦に加えられた張力によって決まる振動数(固有振動数)で振動する。この実験では、正弦波発振器に接続された電磁石の振動と弦の振動との共振現象を利用して、弦の固有振動数と弦の長さ、張力および線密度との関係を調べる。さらに、弦の密度が不連続だったり、離散的であったりした場合の固有振動数について調べる。

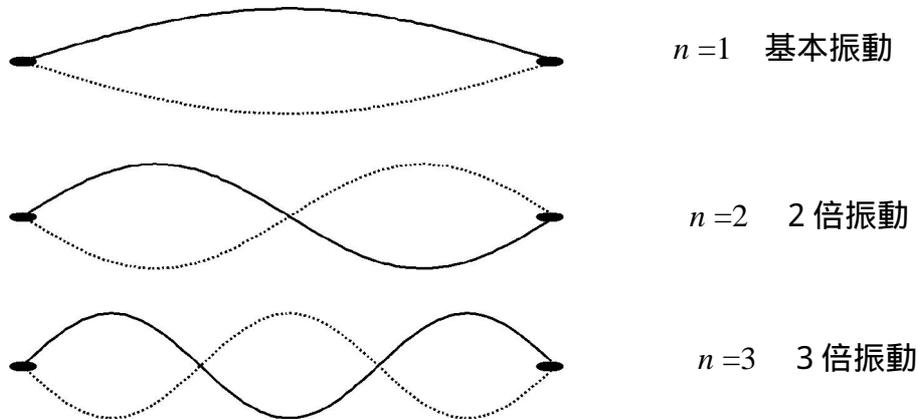
実験の背景：

弦の一端を連続的に振動させると、その振動は波となって弦を伝わり、他端で反射して反射波を生じる。反射波と元の波を重ね合わせたものが、実際の弦の運動として観察される。振動の振動数を調整すると、ある特定の振動数のときに限って、弦上で大きく振動する部分(腹)と全く振動しない部分(節)が明確に区別できる状態になる。つまり、定常波ができる。

両端を固定した弦にできる定常波について考えてみる。両端を固定した弦にできる定常波は、図に示すように両端が節にならなければならない。弦の長さを L [m]、弦に生じた波の波長を λ [m] とする。このとき、半波長の整数倍が弦の長さ L に等しいことから、

$$\frac{n\lambda_n}{2} = L \quad (n=1,2,3,\dots) \quad \dots\dots(1)$$

となる必要がある。この条件を満たす場合に限って、定常波が発生する。



弦を伝わる波の速さ v [m/s] は、弦の張力を T [N]、線密度(長さ 1 m あたりの質量)を ρ [kg/m] とすると、

$$v = \sqrt{\frac{T}{\rho}} \quad \dots\dots(2)$$

で与えられる。また、波長が λ_n [m] のとき、波の振動数 f_n [Hz] は、

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{\rho}} \quad (n=1,2,3,\dots) \quad \dots\dots(3)$$

となる。(3)式から、定常波ができるときの振動数は、弦の長さ、弦の線密度、および弦に加えられた張力から決まるある特定の値となることがわかる。そのような振動数を固有振動数という。

実験装置：

実験問題1で使用する装置の配置を写真1に示す。これらは から に示した物品より構成されている。以下それぞれについて簡単に説明する。



写真1

架台（滑車・物差し付）

電磁石：詳細を写真2に示す。直径6mm、長さ約140mmの軟鉄棒に直径0.55mmの被覆（ひふく）銅線を4層巻いてある。片方の端はナットで支持台と平行になるように固定されている。反対側の先端は、直径約2mmと細くなっており弦を通す穴があいている。両側にはフェライト磁石が2個固定されている。支持台の裏にはゴム製の磁石が数枚貼られており鉄製の架台に安定して固定できるようにになっている。電磁石を動かすときは支持台の両側を指ではさむようにして持ち上げると簡単に架台からはずすことができ、必要な場所に置けばよい。



写真2

リード線（端子つき）：電磁石棒のコイルに電流を流すための、長さ約1mのビニールコード。このコードの先端の端子をそれぞれ の発振器の出力端子+、-に接続する。今回の場合どちらのコードを+あるいは-に接続してもよい。

おもり：フックと分銅よりなる。

フック：(分銅をつるすための直径 3 mm の銅線 重さ 9.5 g) 1 個

分銅：直径 30 mm，厚さ 2 mm の鉄製ワッシャー (1 個の重さ 9.5 ± 0.1 g) 15 枚

弦

被覆銅線：直径 0.1 mm，長さ約 3 m，1 本， 線密度 7.3×10^{-5} kg/m

被覆銅線：直径 0.2 mm，長さ約 1 m，3 本， 線密度 2.9×10^{-4} kg/m

被覆銅線：直径 0.3 mm，長さ約 1 m，3 本， 線密度 6.5×10^{-4} kg/m

ビーズ玉 10 個 (予備を含む) と長さ約 1 m の釣り糸 1 本

発振器：詳細は次の実験の手順の項で述べる。

実験の手順：

1 実験装置の設置

写真 1 のように，架台を実験機の左側手前に置き，滑車が左端にくるようにする。電磁石棒の先端に指定された弦を接続し，弦のもう片方の先にフックを取り付け，おもりの分銅をつるし，左端の滑車を通し鉛直にぶら下げる。

2 弦を振動させる方法

写真 2 の電磁石に電流を流すことによって，軟鉄棒の先端はその電流の向きによって N 極または S 極に磁化する。そのとき，左右に設置されているフェライト磁石によって，電磁石棒の先端は，左または右に磁気力を受ける。写真 2 のコイルの電流導入端子を写真 3 の発振器の出力端子に接続して，発振器の電源スイッチを ON にすると，コイルに交流電流が流れ，電磁石棒の先端は，N 極または S 極に交互に変化する。これによって，電磁石棒は左右に振動する。このとき電磁石に流れる交流電流の周波数と電磁石棒の振動数は等しい。

3 発振器の使用法



写真 3

写真 3 の発振器は，電磁石棒を振動数を変えて振動させるために使用する交流電流発生装置である。出力電流の波形，装置の使用方法を以下に述べる。

出力波形および周波数

出力波形は正弦波で、出力の周波数は 1Hz から 200Hz まで可変である。1.0Hz ~ 99.9Hz は 0.1Hz ステップで可変。100Hz ~ 200Hz は 1 Hz ステップで可変。

出力周波数の設定方法

アップダウン式。写真 3 に示すように、発振器上面にある HERTZ 表示のボタンを押し続けると発振周波数が大きくなり、前面のカウンターにデジタルで発振周波数が表示される。ボタンを押している間は、周波数カウンターの表示は変わるが、出力される周波数はボタンを押す直前の値のままである。ボタンを離すとそのとき表示されている周波数の出力が得られる。発振周波数を下げるときはその下にある、HERTZ 表示のボタンを同じように押し続け、必要な周波数になったとき、ボタンを離すとそのとき表示されている周波数の出力が得られる。

出力電圧の調整方法

発振器からの出力電圧は POWER と表示されているつまみを回すことによって変えられる。右側に回すほど出力電圧が大きくなり、左側に回すほど出力電圧が小さくなる。

4 実験を進める上での注意

この実験では、両端を固定された場合の弦の振動を調べることを目的としている。滑車で支えられている側は固定端とみなして問題はない。つまり振動の節になる。振動源である、電磁石棒に接続されているところの弦は、厳密には固定端ではない。しかし今回の実験では、目に見えない程度の小さな電磁石棒の振幅でも、その共振状態においては、振動の腹の部分に十分な振幅が見られ、電磁石棒に接続されているところを共振振動の節とみなすことができる。

ここで使用している電磁石棒は、周波数が約 40 ~ 50Hz 付近で電磁石棒が目に見える程度に大きく振動する場合がある。このような場合は当然電磁石の先端部分を振動の節とみなすことはできない。このようなときは出力 POWER のつまみを左に回して、先端部分の振動の振幅が十分小さくなるように調整すること。また、弦を付け替える時は、発振器の出力を最低にして電源を OFF にすること。

課題 1 . 弦に垂直な方向に振動させたときの固有振動を観測する

課題 1 - 1 . 基本振動 , 2 倍振動 , 3 倍振動の観測

直径 0.3 mm の被覆銅線を電磁石棒の先端の穴に通し、電磁石棒の先端に十分からませ、引っ張っても抜けないようにする。銅線のもう片方の先を下図のように丸めてよじり、その中に分銅をつるすためのフックの丸くなった先端部分をはめてつるす。

フックにおもりをつるしても弦からフックが落ちないようにすること。写真 5 のように、フックのついたほうの弦を架台の左端に取り付けられている滑車を介して鉛直にぶら下げる。その際フック、おもり、弦が机の脚等に触れないように注意すること。写真 4 に示すように、電磁石の台の手前の面が、架台の手前の面に一致するように平行に置くと、水平に張られた弦がちょうど架台に張られた物差しの端付近にくるようになる。

フックにおもりのワッシャーを 7 枚つるす。このとき、おもり全体の質量は $(8 \times 9.5) \text{ g}$ になる。



電磁石棒の先端を架台に張ってある物差しで、70 cm の位置にくるように置く。このとき弦の長さが 70 cm となっていることを確認せよ。もしずれていた場合は、弦の長さが 70 cm になるように電磁石の位置を調整せよ。

電磁石棒のコイルからのリード線はまだ発振器に接続させない。接続した場合ははずすこと。発振器の出力 POWER のつまみを左いっぱいに戻す（0 の方向）。発振器の右端の POWER のスイッチが OFF の方向に押されていることを確認せよ。ON の状態になっていたら必ず OFF の状態にせよ。次に発振器の電源コードのプラグを AC 100 V のコンセントに差し込む。発振器の POWER のスイッチを ON にする。発振周波数の表示ランプが点灯することを確認せよ。点灯しない場合は連絡せよ。発振器からの出力周波数が 20 Hz 付近になるように HERTZ または HERTZ のボタンを押して調整せよ。20 Hz 付近の周波数が得られたら、一度発振器の電源 POWER を OFF する。次に電磁石棒のコイルからのリード線を発振器の左端にある出力端子に接続する。接続の際 + , - を区別する必要はない。結線に間違いがなければ発振器の POWER を ON にする。次に、POWER のつまみを最大出力の約 1/4 ~ 1/5 程度右に回してみると電磁石棒が水平方向に振動しているのがわかる。指でそっと電磁石棒の先端に触れてみると振動しているのが確認できる。発振周波数を HERTZ のボタンを押して 1 ~ 2 Hz 程度上げ、ボタンを離し、弦の振動の様子を観察する。さらにまた 1 ~ 2 Hz 程度上げ、振動の様子を観察し、弦の振幅の大きくなる周波数をさがす。周波数を上げすぎたと思ったら HERTZ のボタンを押して周波数を下げる。このように、徐々に追い詰めて弦の振動の振幅が最大となるときの発振周波数すなわち、共振振動数を求める。これが基本振動である。基本振動が観測されたら、次に 2 倍振動、さらに 3 倍振動の固有振動を観測して、それぞれの共振振動数を記録する。

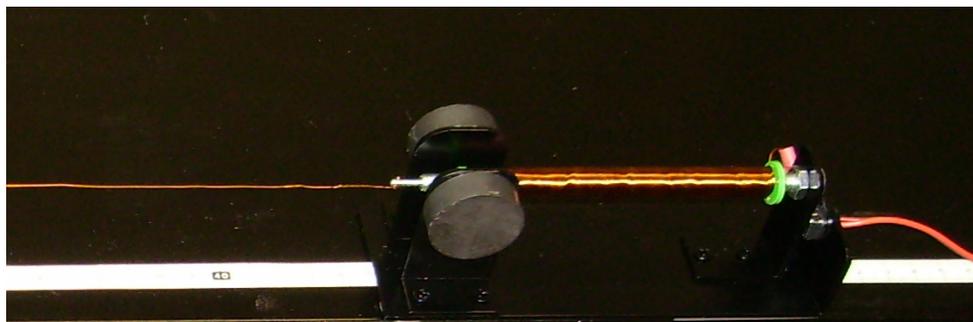


写真 4

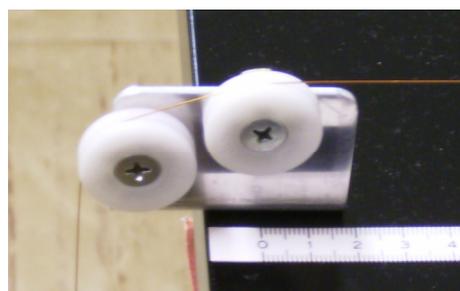


写真 5

注意：2倍振動の観測の際，弦の節の状態が安定せず上下に振動しはじめる場合がある。このようになったときには節の位置で弦を下側からそっと指でもちあげ弦の上下方向の振動をおさえてやると，安定した振動状態が得られる。また出力 POWER を小さくしてやると安定した振動が得られる場合がある。

課題1 - 2 . 実験の整理・考察

課題1 - 1 の測定値から，倍振動数の基本振動数に対する倍数を求めよ。直径 0.3mm のこの銅線の線密度は 6.5×10^{-4} kg/m，また重力の加速度は 9.80 m/s^2 として，基本振動数の測定値と (3) 式による計算結果とを比較検討せよ。

課題2 . 弦の長さ一定の時の，張力と基本振動の共振振動数の関係を調べる

課題2 - 1 . 共振振動数の測定

弦として，課題1 で用いた，直径 0.3 mm の被覆銅線をそのまま用いる。弦の長さが 50 cm になるように電磁石棒を架台にセットする。フックにおもりのワッシャーを1個つるす(おもりの総質量は $2 \times 9.5 \text{ g}$)。

発振周波数を調節して基本振動を観察し，その共振振動数を測定し記録する。

同様に，おもりのワッシャーを2枚ずつ増やし，弦の張力を変えて，それぞれの場合の基本振動の共振周波数を測定し解答用紙に指定されている表に記録する(フックもおもり1個と数える)。

課題2 - 2 . 実験の整理・考察

おもりの重さに対する基本振動の共振振動数の関係をグラフにプロットする。このとき振動数とおもりの質量の平方根を両軸にとって，グラフにプロットすると，両者の関係が分かりやすい。

課題3 . 張力一定の時の，弦の長さとは基本振動の共振周波数の関係を調べる

課題3 - 1 . 共振振動数の測定

弦として，直径 0.3 mm の被覆銅線を用い，フックにワッシャーを7個つるし，おもりの質量を $(8 \times 9.5) \text{ g}$ とする。

電磁石棒を移動させ，弦の長さを，40 cm から 80 cm まで 10 cm おきに变化させ，それぞれの基本振動の共振振動数を測定し記録する。

課題3 - 2 . 実験の整理・考察

弦の長さに対する基本振動の周波数の関係をグラフにプロットし，その結果について考察せよ。その際グラフの両軸をどのようにとれば，両者の関係が見やすくなるか考えてプロットしなさい。

課題 4 . 弦の長さ，張力を一定として，線密度と基本振動の共振振動数の関係を調べる

課題 4 - 1 . 共振振動数の測定

いまセットされている直径 0.3 mm の銅線で，弦の長さを 50 cm，おもりの重さを(6×9.5) g として，発振周波数を調節して弦に基本振動をつくり，その共振振動数を記録する。

弦を直径 0.2 mm の被覆銅線に変えて，同様な測定を行う。すなわち，弦の長さは 50 cm，おもりの重さを(6×9.5) g とし，基本振動の共振振動数を測定し記録する。

同様な測定を直径 0.1 mm の被覆銅線（長さ約 1m に切って使用）に変えて基本振動の共振振動数を測定し記録する。

課題 4 - 2 . 実験の整理・考察

ここで使用した被覆銅線の線密度はそれぞれ次のようになっている。

直径 0.1 mm の被覆銅線の線密度は， $7.3 \times 10^{-5} \text{kg/m}$

直径 0.2 mm の被覆銅線の線密度は， $2.9 \times 10^{-4} \text{kg/m}$

直径 0.3 mm の被覆銅線の線密度は， $6.5 \times 10^{-4} \text{kg/m}$

弦の線密度と，基本振動の共振振動数の間の関係について考察せよ。

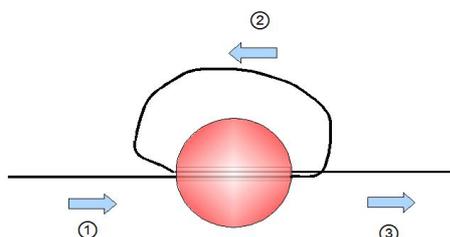
これまでは，弦上のすべての位置で線密度が均一な弦について，その固有振動を調べた。つぎに，線密度が均一でない弦についての固有振動を調べる。

課題 5 . 線密度が不連続な弦の振動

課題 5 - 1 . 弦にビーズを等間隔につけた場合の振動を調べる

ビーズの穴に下図のように，釣り糸を 2 回通しからませる。さらにその先に同じようにして，ビーズを釣り糸にからませ，合計 7 個のビーズを一本の釣り糸にからませる。糸の片方の端にはおもりをつるすフックをつける。釣り糸は弾力があるので縛りにくいが工夫してフックが外れないようにセットする。

ビーズのついた，釣り糸のはしを電磁石棒の先端の穴に通し，糸を 2 回ほどしばり，引っ張っても糸が電磁石棒からぬけないようにする。釣り糸はすべりやすいので，糸をゆるめてやると，簡単にビーズの位置をすべらして，動かすことができる。まず最初のビーズが電磁石棒の先端から約 6 cm の位置にくるようにする。さらに約 6 cm はなれて 2 番目のビーズがくるようにする。このようにして，釣り糸に 7 個のビーズがそれぞれ，約 6 cm 間隔に固定された弦ができる（写真 6）。したがって弦の長さは，約 48 cm となる。



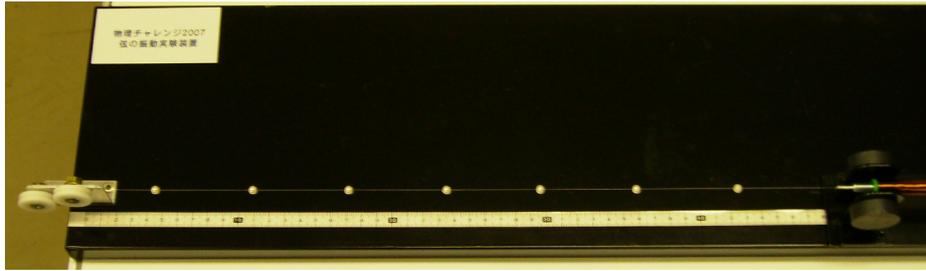


写真 6

この弦にかかるおもりの個数を 4, 6, 8, 10, 12 個(フックもおもり 1 個と数える)と変えて、それぞれの場合の基本振動の共振振動数を測定し記録する。

課題 5 - 2 . 実験の整理・考察

おもりの質量に対する基本振動の共振振動数の関係をグラフにプロットし、その結果について考察せよ。

弦(ビーズのついた釣り糸)が均一な線密度の弦であったと仮定したときの基本振動の振動数を計算し、測定値と比較せよ。ただし、7 個のビーズと釣り糸の質量は、0.76g とする。

の結果について考察せよ。

ヒント：長さ L の間隔で質量 m のビーズがつながった弦がある。これが真っ直ぐになった状態を考える。いま、あるビーズが弦と垂直な方向に h だけ動いたとする。このとき、すぐ隣のビーズへのその動きが伝わる時間は次のようにして推定できる。隣のビーズが力を受けなくなる平衡の位置はビーズと同じ方向に $h/2$ 移動した位置である。平衡の位置からずれたビーズは、両側の弦の張力 T によって復元力を受ける。その運動は、バネ定数 $k = 2T/L$ のバネで平衡の位置に束縛されている質量 m の質点に同じと考えてよい。このとき、平衡の位置に戻るまでの時間は、 h の大きさとは無関係に、 $\frac{1}{4} \times 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{mL}{2T}}$ となる。この時間に動きが長さ L だけ伝わったことになる。したがって、ビーズの動きが弦上で伝播する速度は

$$L \div \left(\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{mL}{2T}} \right) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \sqrt{\frac{TL}{m}} \approx \sqrt{\frac{TL}{m}} \text{ になると推定できる。}$$

課題 6 . パラメトリック励振

課題 6 - 1 . 弦に平行な方向に振動させたときの固有振動(パラメトリック励振)を観測する

今までは振動源である電磁石棒の振動によって弦に垂直な方向に振動が与えられた。今回は写真 7 のように振動源である電磁石棒を弦に垂直にセットすることによって、弦と平行な方向に振動が与えられる。このようにして弦を振動させると、写真 7 において、振動棒が向かって右側に振動したとき弦は一直線に引っ張られる。そこから振動棒が左側に振動し始めると弦はゆるめられ、たとえば下側にたるみ

始める。そして、振動棒がもっとも左側に来たとき弦はもっともたるんだ状態になる。次に振動棒が右に動き始めると、弦は引っ張られて上昇しはじめ振動棒がもっとも右に来たとき弦は一直線に引っ張られる。さらに振動棒が左に動き始めると、弦は上向きを持っていくため、慣性でそのまま上昇し上側にたるむ。さらに振動棒が右側に動き始めると弦は一直線に引っ張られる。以下このような振動を繰り返す。このような振動では、振動棒が2回振動する間に、弦は1回しか振動しない。

これから、(電磁石棒の振動数) = (弦の振動数) × 2 となる。

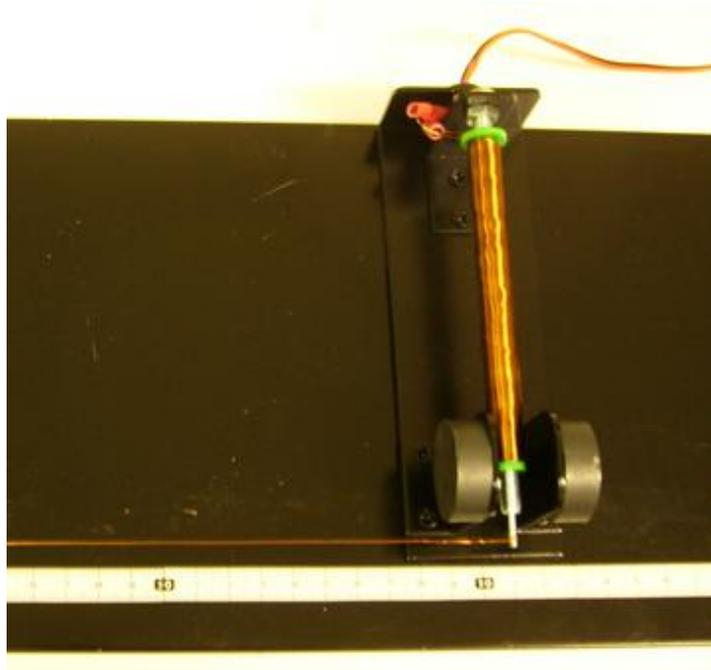


写真7

電磁石棒を写真7のように弦に垂直にセットする。直径0.3 mmの被覆銅線を電磁石棒の先端の穴に通し、弦にからませ、引っ張っても抜けないようにセットする。

課題1-1と同じように、弦の長さが70 cmとなるようにセットし、フックにおもりのワッシャーを7枚つるし、おもり全体の質量を(8×9.5) gとする。

発振器の周波数を調整し、課題1-1で観測された基本振動の振動数付近で共振が得られることを確認する。

課題1-1で観測された2倍振動の共振振動数付近で上下方向に大きな振幅で振動する共振が見られる。発振器の出力POWERを小さくして安定な振動が得られるように調整する。

この振幅の大きな振動がパラメトリック共振の基本振動に対応する。さらに2番目の固有振動を観測して、それぞれの共振振動数を記録する。

課題6-2. 実験の整理・考察

課題1-1における測定値と比較検討せよ。また、課題1-1の観測の際2倍振動の節付近が安定せず振動しだすような現象が見られたと思うが、その理由を考えてみよ。

実験問題 2

実験に向けて：

実験のテーマは、おもりを糸でつるした単振り子の共振（あるいは共鳴）である。単振り子の周期 T は、つり下げるおもりの質量には関係せず、糸の長さ l と重力加速度 g を用いて、 $T = 2\pi\sqrt{l/g}$ で表すことができる。例えば、図1のように1本のひもに同じ長さの単振り子A、Cと、これと長さが異なる単振り子Bをつるし、Aを振動させると、Aと長さの異なるBの振れは小さく、Aと同じ長さのCが大きく振れる「共振」と呼ばれる現象が現れる。次に、Cの振り子が振れているときに、Aの振り子をいったん止めたのち新たにAを振動させると、振動させるタイミングの違いによりA、Cの振動の様子が異なることが観測される。これは、Cの振り子が一周期の振動の中のどの位置にあるときに、Aの振動が加えられたかによるものである。一周期の振動の中の位置は、振動を表す式 $y = A\sin\theta$ の θ で表され、この θ を「位相」という。

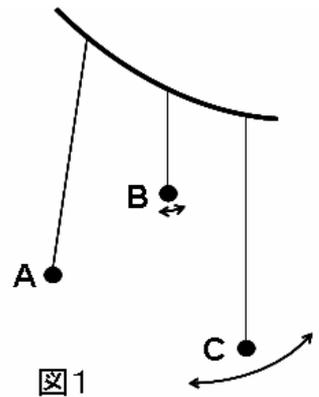


図1

この実験問題では、単振り子の支点を水平に一定の周期で振動させたり、つり下げている糸の長さを一定の周期で伸ばしたり縮めたりする外部からの作用と、単振り子の振動との間の共振について調べる。共振は互いの振動の振動数に関係するばかりではなく、どのような位相にあるかにより、それぞれ現れる現象が異なる。初めに、外部からの作用と共振を起こす単振り子の振動数を調べ、次に、その振動数からわずかにずれた振動数を単振り子に持たせた場合に現れる現象を調べる。さらに、外部からの作用と単振り子の動きの間の位相の違いにともない、共振がどのように変化して現れるかを観測する。位相を変化させるには、外部から作用している振動に対して、単振り子を振らせ始めるタイミングを変えることを行うが、なれていないと初めのうちは難しく感じるかもしれないので注意深く行う必要がある。応用例として、走行クレーンで荷物を運ぶときに生じた荷物の揺れに対して、どのようにクレーンを動かしたら揺れを止められるか、また、ブランコをこぐときに重心をどのように移動させたら効果的か、について考察する。共振現象は、力学的な振動のみならず電磁気学的な振動でも数多く見られる、普遍的で物理的に大変興味深い現象であり、幾多の応用と共に抑制手法が考案されている。

実験の目的：

おもりを糸でつるした単振り子は一定の周期で振動する。(1) 支点を一定の周期で水平に振動させながらおもりを振らせると、おもりはどのような動きをするであろうか。また、(2) 糸の長さを一定の周期で伸ばしたり縮めたりさせながらおもりを振らせると、おもりはどのような動きをするであろうか。実験では、単振り子に現れる2種類の共振現象が、どのような振動数のときに観測されるか、また、位相の変化にともないどのように現象が変わって現れるかを、直接眼で見て確認し理解する。

実験で使用する装置・物品の説明：

実験装置の全体図を図2に示す。

実験装置は、(1) モータ（毎分80回転）、(2) 水平振動板、(3) 単振り子（2種類）、(4) 糸長および振れ角測定スケール付背面ボード、(5) おもり支え板、で構成されている。

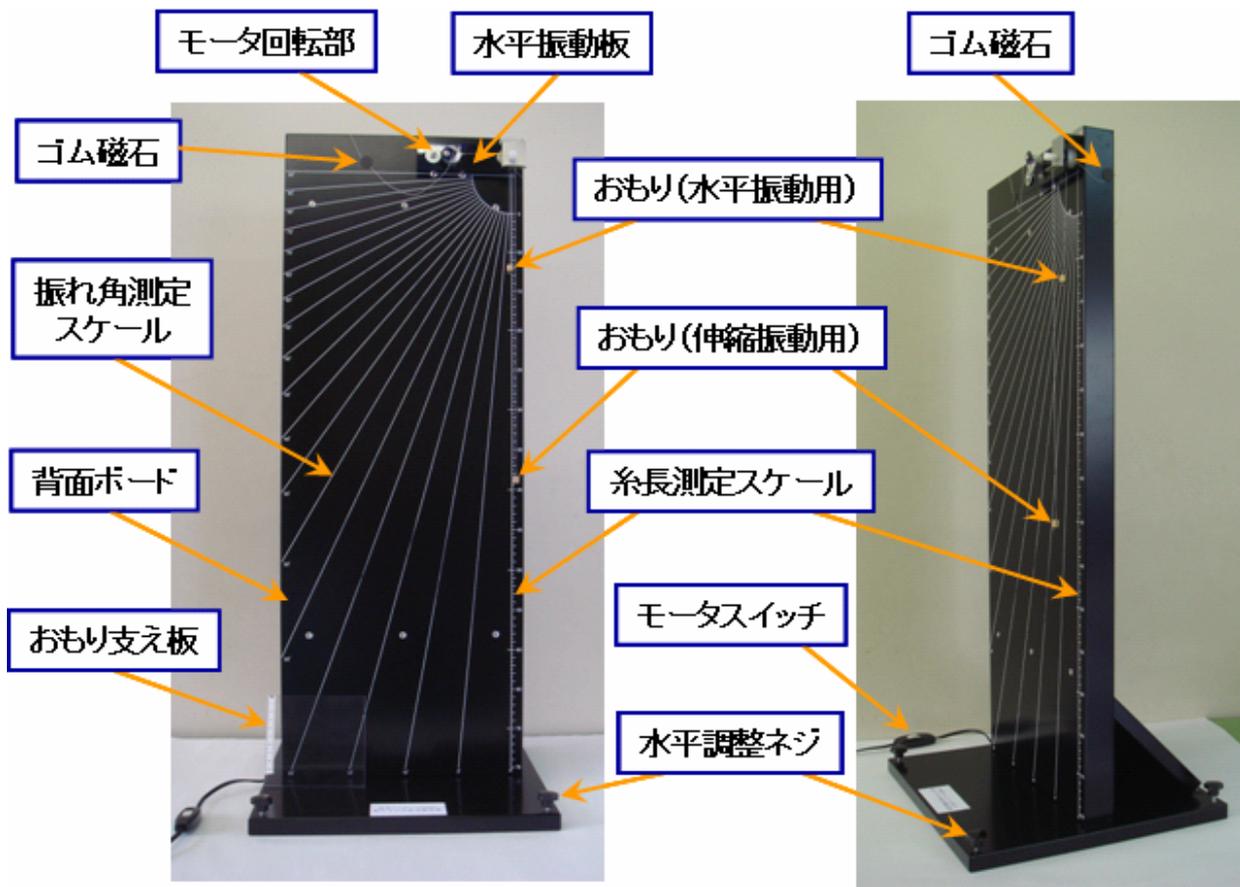


図2 正面図

側面図

装置上部の拡大図を図3に示す。

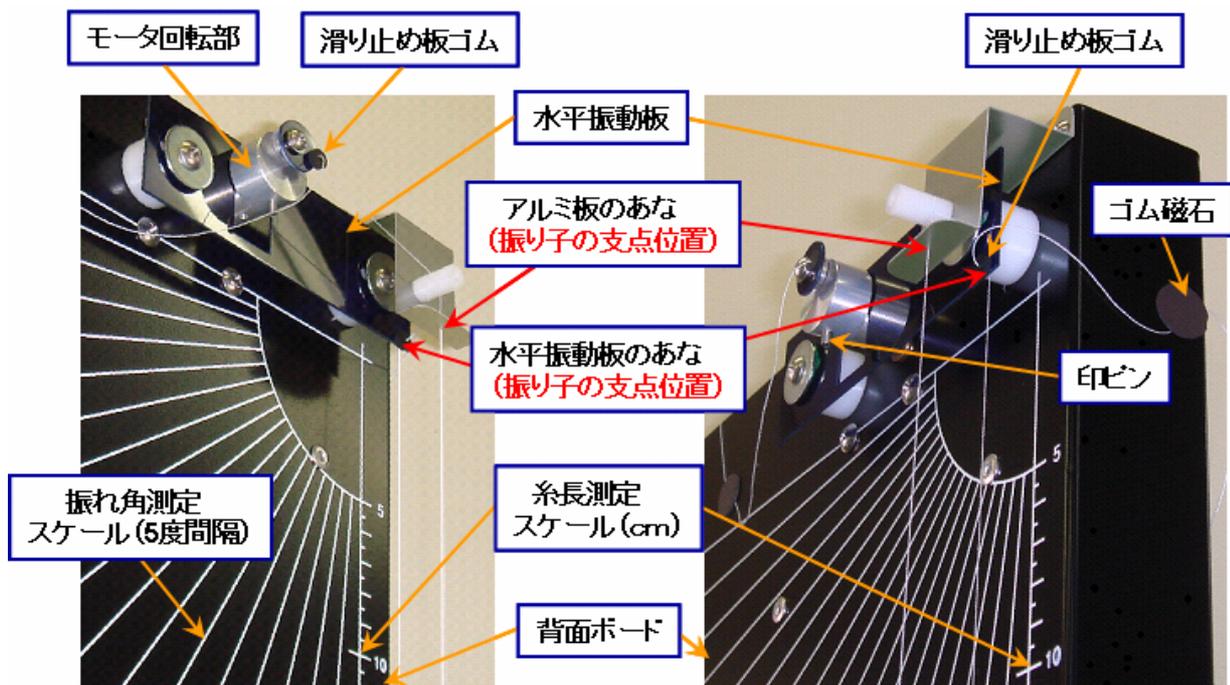


図3 上部拡大図

以下各物品について説明する。

◆モータ

交流 100 V を入力とし、毎分 80 回転の回転運動を行う。実験装置の下方に付いているスイッチのオン・オフにより、回転運動の開始・停止を行う。

◆水平振動板

モータの出力回転を、水平振動に変える。振動板はプラスチック平板で下方の隅に小さい孔（あな）が開けられ、糸を通して振り子の支点としている。支点は水平に - 5 mm から + 5 mm の間を単振動する。

◆モータ回転部

モータの回転軸から少しずらした位置に小さなプラスチック板がゆるく取り付けられ、板の隅の小さい孔（あな）に糸が通されている。糸の一方は滑り止め板ゴム（ ）に通され、他方は鉛直下方に曲げられて、アルミ板の小さい孔に通されたのち、おもりをつり下げている。アルミ板の孔が振り子の支点で、振り子の糸の長さは - 15 mm から + 15 mm にわたって伸びたり縮んだりする。また、モータの回転が見やすいように、回転部に印ピンが目印としてとり付けられている。

◆滑り止め板ゴム 4 枚（ , , , ） 直径 ~ 5 mm, 厚み ~ 1 mm

糸を通した針により板ゴムに通された糸は、ゴムの弾力で滑りが止められている。板ゴムは、水平振動板の孔の直上（ ）と、モータ回転部のプラスチック板の孔の直上（ ）, および各振り子のおもりの下部（ , ）に、それぞれ取り付けられている。

◆単振り子 2 セット

振り子のおもりは真鍮（しんちゅう）製の円柱（直径 8 mm, 高さ 8 mm）で中心軸に沿って小さい孔が開けられており、その孔にポリエステル製のミシン糸が通されている。下部に滑り止め板ゴム（ , ）があり、糸が固定されている。各単振り子の支点は、水平振動板の小さい孔と、アルミ板の小さい孔の位置である。糸の長さを変えるときは、板ゴム（ ）あるいは（ ）を糸に沿ってずらして変える。糸が切れたり抜けてしまった場合は、新しい糸を通した針を用いて振り子を再現する。2 種類の振り子は、モータの回転にともない同時に振動を始めるので、使用していない振り子の糸は短くしておき、測定対象の振り子の振れの妨げにならないようにする。

◆ゴム磁石 2 枚

滑り止め板ゴム（ , ）を通したのちの余った糸は、少したるませてゴム磁石で背面ボードにはさんだのち、裏側の糸巻きで巻き取る。

◆背面ボード

黒塗りのステンレス板で、前面に 5 mm 間隔の糸長測定スケールと 5 度間隔の振れ角測定スケールが白線で目盛られている。ボードの下側には四隅に水平調整用のネジが付けられており、実験を始めるまえに、背面ボード上の糸長測定スケールの白線が、おもりを下げている糸の鉛直線と平行になるように正面と側面から見ながらネジを回して調整する。

◆おもり支え板（補助スケール付）

3 mm × 120 mm × 120 mm のプラスチック板で、図 4 のように振り子を振らせ始めるとき、おもりを支えるのに使用する。また、1 mm 間隔の目盛りが付けられており、5 mm 間隔の糸長測定スケールを補い、より精度よく糸の長さを求めるとき、糸長測定スケールにあてがって測定する。

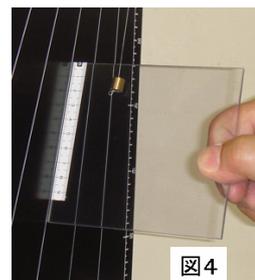


図 4

◆ストップウォッチ

振り子の周期の測定に用いる。スタート・ストップ及びリセットのボタンを右図に示す。



課題 1 . 単振り子による重力加速度の測定

課題 1 - 1 . 単振り子の実験

単振り子の周期 T と糸の長さ l との関係式 $T = 2\pi\sqrt{l/g}$ を用いて、重力加速度 g を算出し、標準値 ($g = 9.80 \text{ m/s}^2$) と比較する。

- (1) 水平振動用振り子の支点が糸長測定スケール上にくるように、モータを短時間オン・オフして動かし、支点の位置を調整しなさい。次に、板ゴム をずらして糸の長さを約 0.7 m にして静止させ、おもりを下げている糸の鉛直線を参考にして、背面ボードが垂直に立つように、正面と側面の両方から見てボードの下側のネジを回し調整しなさい。
- (2) 板ゴム をずらして単振り子の糸の長さ l (支点からおもりの重心までの距離) を 0.640 m になるように調整しなさい。
- (3) おもり支え板におもりをのせ、図 4 に示されているように、振れ角測定スケールに沿って支え板を 10 度に傾け、おもりを静止させたのち、支え板をスケールに沿って静かに下方に滑らせ、静かにおもりはなしなさい。
- (4) ストップウォッチを用いて、10 周期の時間を測定しなさい。
- (5) 同様の測定を 3 回くりかえし、周期 T を求めなさい。
- (6) 糸の長さ l を 0.490 m, 0.360 m, 0.250 m, 0.160 m に変え、10 周期の時間をそれぞれ 3 回測定して、各糸の長さに対する周期 T を求めなさい。

課題 1 - 2 . 実験の整理・考察

- (1) 糸の長さの平方根を横軸に周期を縦軸にとり、測定点を記入してグラフを作り、各点が一つの直線の近傍に位置することを確かめなさい。
- (2) 測定により得られた周期から重力加速度 g を算出し、平均値を記入しなさい。

課題 2 . 支点の水平振動と単振り子の振動との共振

課題 2 - 1 . 共振振動数の実験

- (1) 単振り子の振動数 $f = 1/T$ と糸の長さ l の関係式を求めなさい。また、モータの回転振動数 $f_s (= 80/60 = 1.33 \text{ Hz})$ に一致する振動数を持つ単振り子の糸の長さ l_s , 及び l_s の 1/2 倍, 2 倍, 3 倍, 4 倍の糸の長さを、重力加速度の標準値 ($g = 9.80 \text{ m/s}^2$) を用いて計算しなさい。
- (2) 支点の直上の板ゴム () をずらし、糸の長さを l_s の 4 倍にしなさい。他方の振り子の糸

の長さは測定の邪魔にならないように短めにしなさい。

- (3) おもりをのせた支え板をスケールに沿って 10 度に傾け、モータを始動させて、おもりが支え板上で上下することを確認しなさい。
- (4) 支え板をスケールに沿って静かに下方に滑らせて、おもりが上部に来たときに振り子を振らせ、同時にストップウォッチをスタートさせなさい。
- (5) 振動開始後 5 秒経ったのちの振れ角の振幅を、振れ角測定スケールを用いて測定し、記録しなさい。同じ測定を 2 回繰り返し、平均値をとりなさい。
- (6) 振り子の系の長さを l_s の 3 倍, 2 倍, 1 倍, $1/2$ 倍にして、振動開始後 5 秒経ったのちの振れ角の振幅を、それぞれ 2 回測定し、平均値をとりなさい。

課題 2 - 2 . 実験の整理・考察

- (1) 振り子の系の長さ ($l_s/2, l_s, 2l_s, 3l_s, 4l_s$) の値と、測定した 5 秒後の振れ角の振幅 (平均値) を記入しなさい。
- (2) 共振し振幅が増大する時の振り子の系の長さ l_r を求めなさい。以下の課題ではこの l_r の値を用いなさい。

課題 2 - 3 . 共振近傍での振動の実験

共振を起こす振動数からわずかにずれた振動数を持つように振り子の系の長さを変えると、振り子の振幅がゆっくりと増えたり減ったりするうなりが現れる。この実験では、うなりを直接眼で見て確認し理解する。

- (1) 共振を起こす振り子の系の長さ l_r より 0.020 m だけ糸の長さを短くしたり 0.020 m, 0.030 m, 0.040 m, 0.050 m だけ糸の長さを長くしたりして、以下の (2), (3) の実験を繰り返しなさい。
- (2) 糸の長さを確かめたのち、おもりをのせた支え板をスケールに沿って 10 度に傾けて静かに下方に滑らし、おもりが最も上がったときにおもりをはなしなさい。振り子の振幅は振らせ始めてから徐々に大きくなり、最大になったのちに小さくなり始め、最小になったのちにまた大きくなることをくりかえすと予想される。
- (3) 振り子を振らせ始めてから、最初とその次に現れる最小振幅の間の時間差 (うなりの周期) T を、ストップウォッチを用いて測定しなさい。同じ測定を 3 回繰り返しなさい。

課題 2 - 4 . 実験の整理・考察

- (1) l_r の糸の長さを持つ振り子の振動数 f_r を求めなさい。また、 $\Delta l = -0.020 \text{ m}, 0.020 \text{ m}, 0.030 \text{ m}, 0.040 \text{ m}, 0.050 \text{ m}$ のそれぞれの場合について、 $l_r + \Delta l$ の糸の長さを持つ振り子の振動数 $f_r + \Delta f$ を算出し、 f_r との振動数の差 Δf を記入しなさい。さらに、それぞれの場合について測定したうなりの周期の平均値を記入しなさい。
- (2) 振動数 $f_r + \Delta f$ の振り子固有の振動に、振動数 f_r の外からの作用が加わった場合を単純化したモデルの式 $y = \sin(2\pi f_r t) + \sin(2\pi(f_r + \Delta f)t)$ を考える。合成された振動の振幅の変化 (うなり) の周期 T を表す式を求めなさい。

必要なら、三角関数の公式 $\sin A + \sin B = 2 \sin\left(\frac{A+B}{2}\right) \cos\left(\frac{A-B}{2}\right)$ を用いなさい。

また、2 種の振動を図に描き、うなりの発生を説明しなさい。

- (3) 方眼紙に、糸長を横軸にうなりの周期を縦軸にして実験点を記入し、上記の単純化した式の結果と比較しなさい。横軸と縦軸を工夫しグラフを見やすい形にするのも良い。

課題2 - 5 . 共振の位相依存性の実験

支点の水平振動と振り子の振動との共振では、振り子が振れ始めてから振幅が徐々に大きくなる場合と、振れ始めてから振幅が徐々に小さくなり、ほとんど振れなくなってからまた振幅が大きくなる場合がある。この2つの場合の違いの原因は、振り子を振らせ始めたときの支点の振動の位相の違いにある。

- (1) 糸の長さを l_r に合わせ、おもりをのせた支え板を 10~30 度のいずれかのスケールの線に合わせなさい。水平振動板(プラスチック平板)、またはモータ回転部の印ピンの動きに注目し、振り子を振らせ始めるタイミングとして、支点の位置が振り子に、
- (a) 最も近づいているとき、
 - (b) 最も遠ざかっているとき、
 - (c) 前両者のちょうど中間で遠ざかる向きするとき、
 - (d) 同じくちょうど中間で近づく向きするとき、
- に分けて、振り子を振らせ始めなさい。振らせ始めるときの支点の位置と振り子の振幅の変化とに注目して実験しなさい。良い実験をするために、振り子の振り幅を変えるなどして、現象が現れ易くなるように工夫しなさい。

課題2 - 6 . 実験の整理・考察

- (1) 振り子の振幅が、振らせ始めてから徐々に最も大きく増大し続けるときの、振動開始時の支点の位置は、(a)、(b)、(c)、(d)の何れの場合になるか、見だしなさい。
- (2) 振り子の振幅が、振らせ始めてから最も大きく減少し、ほとんど振れなくなったのちに増大し始めるときの、振動開始時の支点の位置は、(a)、(b)、(c)、(d)の何れの場合になるか、見だしなさい。
- (3) 前問の(1)、(2)の場合、時間が経つにつれおもりがどのように動いたか、時間を横軸に振れ角を縦軸にとり大体の動きを図示しなさい。またどうしてその様な動きになるのか、支点の動きと振り子の動きを図に描いて説明しなさい。
- (4) 室内の走行クレーンで荷物をつり上げ、水平に運んで止めたところ荷物が揺れ始めた。荷物を振り子のおもり、ワイヤーロープを糸と見なして、支点を左右に動かせるとしたとき、揺れを小さくするには荷物の動きに対して支点をどのように動かしたら良いか、実験結果と対応させて説明しなさい。

課題3 . 糸の伸縮振動と単振り子の振動との共振

課題3 - 1 . 共振振動数の実験

- (1) 単振り子の振動数 $f = 1/T$ と糸の長さ l との関係式を求めなさい。モータの回転振動数 $f_s (= 80/60 = 1.33 \text{ Hz})$ に一致する振動数をもつ単振り子の糸の長さ l_s と、 l_s の2倍、3倍、4倍、5倍の糸の長さを算出しなさい。

- (2) モータ回転部の滑り止め板ゴム () を糸に沿ってずらし，伸縮振動用の振り子の糸の長さを l_s の 5 倍の長さになるようにしなさい。他方の振り子の糸は短くするなど，測定の邪魔にならないように工夫しなさい。
- (3) おもりをのせた支え板をスケールに沿って 10 度に傾け，モータを回転させて，おもりが支え板上を上下に動くことを確かめなさい。
- (4) 支え板をスケール線に沿って 10 度のまま静かに下方に滑らせて，おもりが上りきったときに支え板から外して振らせ始め，同時にストップウォッチをスタートさせなさい。
- (5) 振らせ始めてから 30 秒経ったのちの振れ角の振幅を，振れ角測定スケールを用いて測定し記録しなさい。同じ測定を 2 回繰り返して，平均値を求めなさい。
- (6) 同様にして，振り子の糸の長さを l_s の 4 倍，3 倍，2 倍，1 倍にして，振らせ始めてから 30 秒経ったのちの振れ角の振幅を，2 回ずつ測定し，平均値を求めなさい。

課題 3 - 2 . 実験の整理・考察

- (1) 振り子の糸の長さ ($l_s, 2l_s, 3l_s, 4l_s, 5l_s$) の値と，測定した 30 秒経過後の振れ角の振幅 (平均値) を記入しなさい。また，共振し振幅が増大するときの振り子の糸の長さ l_r ，および振動数 f_r を求めなさい。
- (2) 糸を伸ばしたり縮めたりして振動させるときに共振する振子の長さが，支点を水平に振動させるときに共振する長さとは異なるのは何故だと考えるか，理由を説明しなさい。

これよりチャレンジ問題：以下の実験は時間に余裕がある場合に行いなさい。
解答内容に応じて加点します。

課題3 - 3 . うなりの観測

系の伸縮振動と単振り子の振動との共振条件の近くで発生するうなりを，直接眼で見て確認し理解する。

- (1) 共振する振り子の系の長さ l_r より例えば $\Delta l = 0.020$ m だけ長くしなさい。
- (2) 支え板をスケールに沿って 10 度に傾け，同様な方法で振り子を振らせ始めなさい。振り子の振幅は振らせ始めたあと徐々に大きくなって飽和し，その後減少し始めて最小振幅になったのち，また大きくなることを繰り返すと予想される。
- (3) 振り子を振らせ始めてから，最初とその次に現れる最小振幅の間の時間差（うなりの周期） T を，ストップウォッチを用いて測定しなさい。同じ測定を 3 回繰り返しなさい。
- (4) 余裕があれば，他の Δl の場合について上記と同様の測定をしなさい。

課題3 - 4 . 実験の整理・考察

- (1) 系の長さ l_r を持つ振り子の振動数 f_r および $l_r + \Delta l$ の系の長さ持つ振動数 $f_r + \Delta f$ を算出し， f_r との振動数の差 Δf を記入しなさい。
- (2) 課題2 - 4 (2) で用いた単純化した式から得られた振幅変化の周期と実験値とを比較し考察しなさい。

課題3 - 5 . 共振の位相依存性の実験

- (1) 系の長さを l_r にして，おもりをのせた支え板をスケール線に沿って 10 度に傾けなさい。モータ回転部に付いている印ピンの動きと系の動きに注目し，(a) 糸が最も長くなったとき，(b) 糸が最も短くなったとき，(c) 前両者のちょうど中間で短くなる向きするとき，(d) 同じくちょうど中間で長くなる向きするとき，の何れのとときに振り子を振らせ始めたら，振り子の振れが大きくなり続けるか，また振り子の振れが始め小さくなりその後大きくなり始めるかを，それぞれ観測しなさい。

課題3 - 6 . 実験の整理・考察

- (1) 振り子の振幅が最も大きく増大するときと，始め最も大きく減衰しその後増大するときは (a)，(b)，(c)，(d) のどの場合か求めなさい。
- (2) 振幅が最も大きく増大するとき，振幅の増大理由を必要なら支点の運動とおもりの運動を図に描くなどして説明しなさい。
- (3) 振り子の振幅が増大するときの原理は，ブランコをこいで振れを大きくする場合の原理と同じである。ブランコをこぐ場合の重心の移動はどのように行われているのか，最も大きく増大する場合の実験結果と対応させ説明しなさい。



実験問題 1 の解答用紙 (両面 3 枚)

第 2 チャレンジ番号	氏 名

課題 1 - 1

測定結果を表の 2 行目にまとめよ。

共振モード	基本振動	2 倍振動	3 倍振動
共振振動数 (Hz)	24.9	50.3	75.1
基本振動数 との比	1	2.02	3.02

課題 1 - 2

結果の考察

- ① 観測された倍振動数と基本振動数のあいだにはどのような関係がみられるか。必要とあれば表の空欄部分を活用せよ。基本振動数の 2 倍、3 倍になっている。
- ② 観測された基本振動数の測定値と (3) 式から推定される振動数の計算結果と比較検討せよ。

$$n = 1 \text{ と置いた (3) 式 : } f_1 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\rho}} \text{ に}$$

$L = 0.7 \text{ m}$, $\rho = 6.5 \times 10^{-4} \text{ kg/m}$, $T = 8 \times 9.5 \times 10^{-3} \times 9.8 \text{ N}$ を代入して計算すると、

$$f_1 = 24.2 \text{ Hz}$$

測定値と計算値はほぼ一致している。

20

点

課題 2 - 1

測定結果を表の 2 行目にまとめよ。

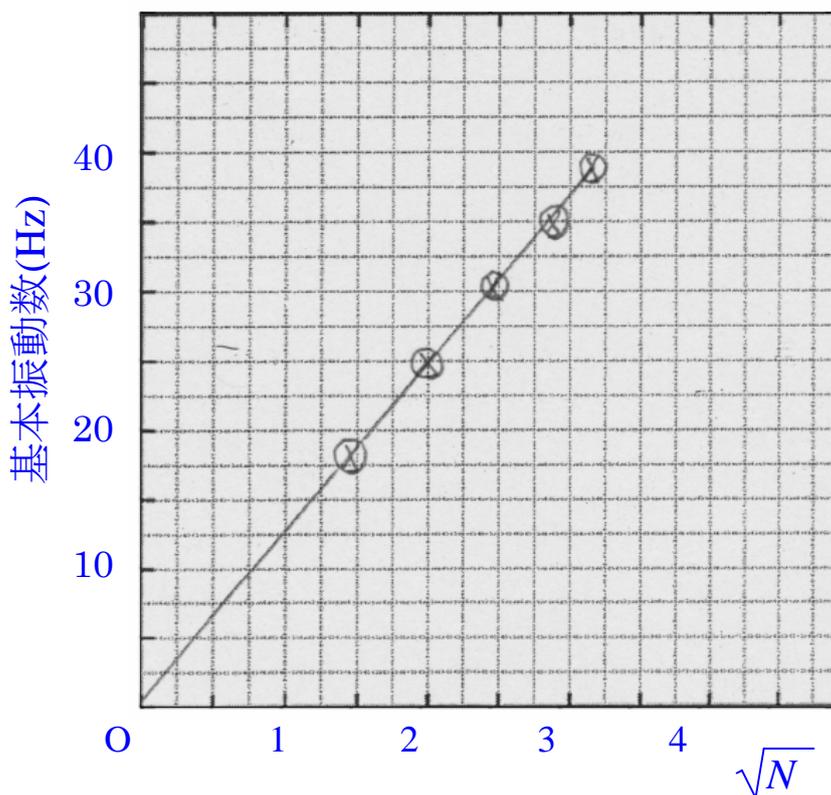
おもりの 個数	2	4	6	8	10
基本振動数 (Hz)	18.0	25.1	30.5	34.8	39.0
\sqrt{N}	1.41	2.00	2.45	2.83	3.16

課題 2 - 2

測定結果のまとめと考察

必要とあらば下のグラフ用紙や上表の空欄部分を活用せよ。

おもりの個数を N と置く。 $T \propto N$ であるので(3)式から、 $f \propto \sqrt{N}$ となることが予想される。基本振動数 f とおもりの個数 N の平方根との関係をグラフにすると、原点を通る直線となり、 $f \propto \sqrt{N}$ が確認された。



15
点

第2チャレンジ番号	氏 名

課題3-1

測定結果を表の2行目にまとめよ

弦の長さ (cm)	40	50	60	70	80
基本振動数 (Hz)	43.4	34.5	29.3	25.4	22.4
$\frac{1}{L}$ (m ⁻¹)	2.50	2.00	1.67	1.43	1.25

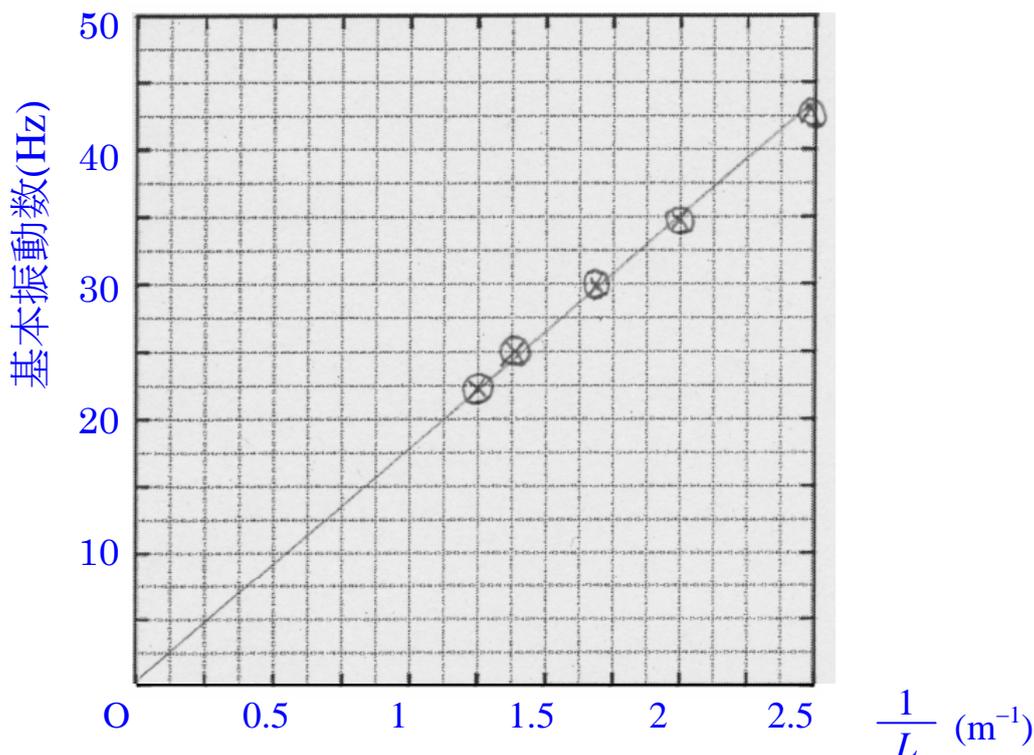
課題3-2

測定結果のまとめと考察

必要とあらば下のグラフ用紙や上表の空欄部分を活用せよ。

弦の長さを L と置く。(3)式から、 $f \propto 1/L$ となることが予想される。

基本振動数 f と弦の長さ L の逆数との関係をグラフにすると、原点を通る直線となり、 $f \propto 1/L$ が確認された。



15 点

課題 4 - 1

測定結果を表の 2 行目にまとめよ

弦の直径(mm)	0.3	0.2	0.1
基本振動数 (Hz)	30.8	44.9	91.8
線密度(kg/m)	6.5×10^{-4}	2.9×10^{-4}	7.3×10^{-5}
$\frac{1}{\sqrt{\rho}}$ ($\text{kg}^{-1/2}\text{m}^{1/2}$)	39	59	117

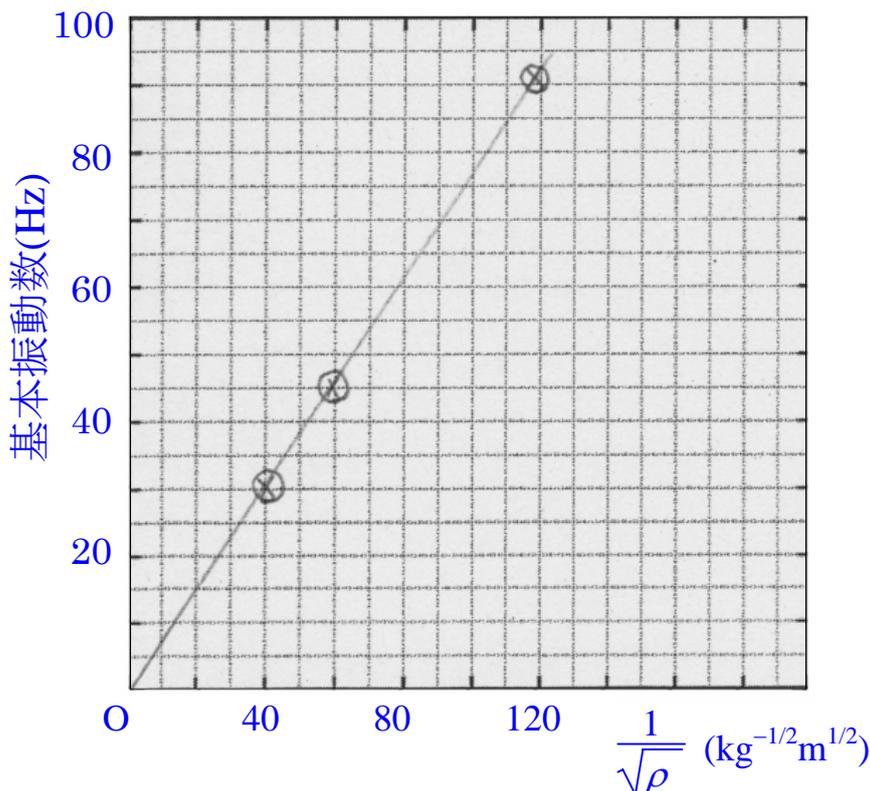
課題 4 - 2

測定結果のまとめと考察

必要とあらば下のグラフ用紙や上表の空欄部分を活用せよ。

弦の線密度を ρ と置く。(3)式から、 $f \propto 1/\sqrt{\rho}$ となることが予想される。

基本振動数 f と弦の線密度 ρ の平方根の逆数との関係をグラフにすると、原点を通る直線となり、 $f \propto 1/\sqrt{\rho}$ が確認された。



15 点

第2チャレンジ番号	氏 名

課題5-1

測定結果を表の2行目にまとめよ。

おもりの 個数	4	6	8	10	12
基本振動数 (Hz)	15.6	19.1	21.9	24.5	26.8
\sqrt{N}	2.00	2.45	2.83	3.16	3.46

課題5-2

測定結果のまとめと考察

必要とあらば下のグラフ用紙や上表の空欄部分を活用せよ。

- ① $f \propto \sqrt{N}$ となることから、基本振動数が張力の平方根に比例することが分かった。
 ② 一様な弦と仮定すると線密度は、 $\rho = 0.76 \times 10^{-3} / 48 \times 10^{-2} = 1.58 \times 10^{-3} \text{ kg/m}$ となる。
 おもりの数 $N=4$ のとき、 $T = 4 \times 9.5 \times 10^{-3} \times 9.8 = 0.372 \text{ N}$ であり、 $L = 0.48 \text{ m}$ として、

基本振動数を計算すると、

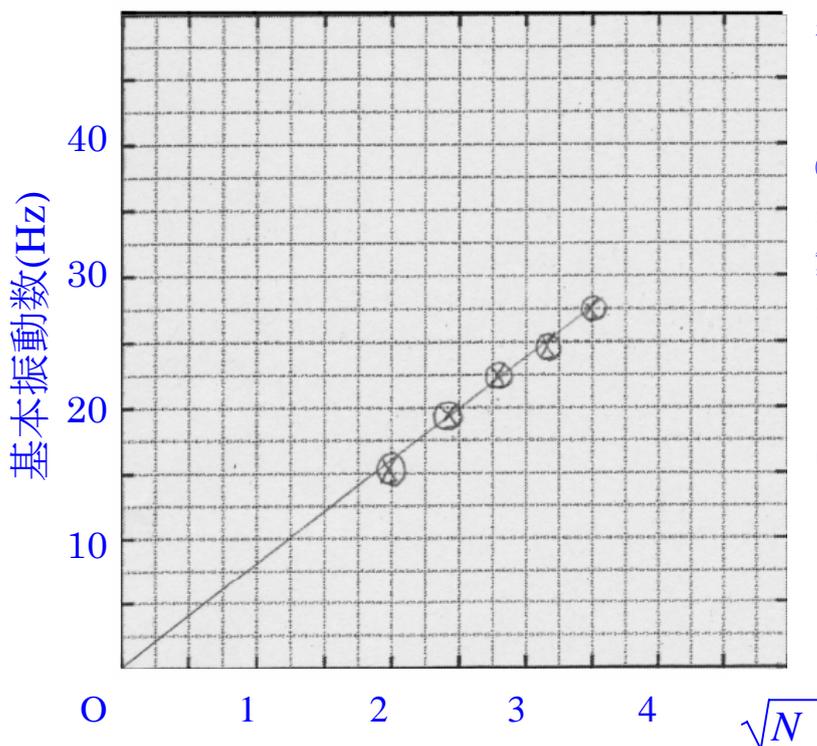
$$f = 15.8 \text{ Hz}$$

となり、測定値とほぼ一致している。

③ ②の結果から、長さ L の間隔で質量 m のビーズが7個つながった弦の基本振動では、波の速さは弦を線密度 $\rho = m/L$ の一様な弦とみなしたときの速さ

$$v = \sqrt{\frac{T}{\rho}} = \sqrt{\frac{TL}{m}}$$

にほぼ一致することが分かった。



20
点

課題 6 - 1

測定結果を表にまとめよ。

基本振動数(Hz)	47.7
2倍振動数(Hz)	98.0

課題 6 - 2

測定結果の考察

弦の一端に、弦に平行な振動を与えると、弦に垂直な振動を与えた課題 1 - 1 の場合の 2 倍振動数 (50.3 Hz) の近く (47.7 Hz) で大きな基本振動の共振が見られ、その約 2 倍の振動数 (98.0 Hz) で 2 倍振動の共振が観測された。

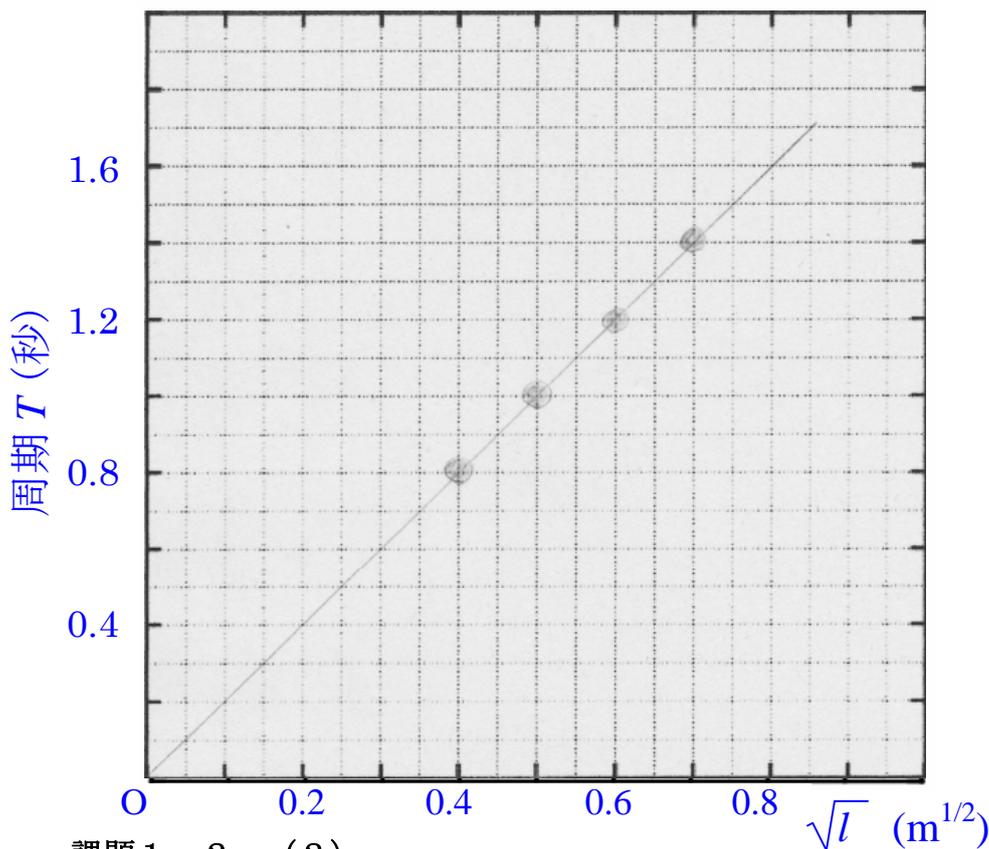
課題 1 - 1 の 2 倍振動のとき、節付近が不安定な振動をしたのは、ここで観測したパラメトリック励振の基本振動が同時に起こったためと考えられる。

15
点

実験問題2の解答用紙 (両面4枚)

第2チャレンジ番号	氏 名

課題1-2 (1)



5
点

課題1-2 (2)

$g = 9.8 \text{ m/s}^2$

5
点

課題2-2 (1)

10
点

	$l_s/2$	l_s	$2l_s$	$3l_s$	$4l_s$
長さ(m)	0.070	0.140	0.281	0.421	0.561
振幅(度)	1×10^1	4×10^1	1×10^1	1×10^1	1×10^1

課題 2-2 (2)

$$l_r = 0.140 \text{ m}$$

5 点

課題 2-4 (1)

$$f_r = 1.33 \text{ Hz}$$

15 点

Δl (m)	-0.020	0.020	0.030	0.040	0.050
Δf (Hz)	0.108	-0.084	-0.122	-0.156	-0.187
うなりの 周期 (s)	~9	~10	~8	~6	~5

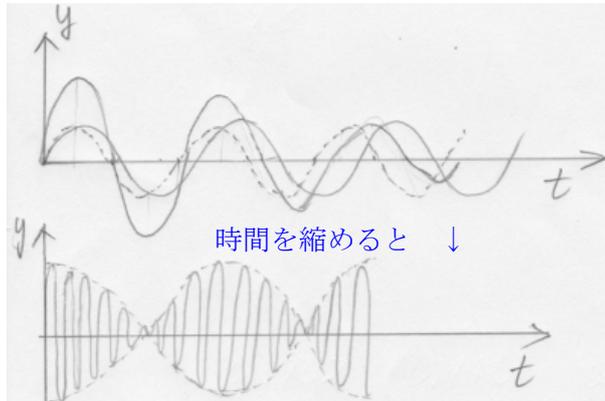
課題 2-4 (2)

$$T = 1/|\Delta f|$$

10 点

$$y = \sin(2\pi f_r t) + \sin(2\pi(f_r + \Delta f)t) = 2\cos(\pi\Delta f t) \sin(2\pi(f_r + \Delta f/2)t)$$

2つの振動数の平均値 $f_r + \Delta f/2$ の振動の振幅が、 $|\cos(\pi\Delta f t)|$ で振動する。これは2つの振動数の差の半分 $|\Delta f|/2$ の2倍の振動数 $|\Delta f|$ で増減する。



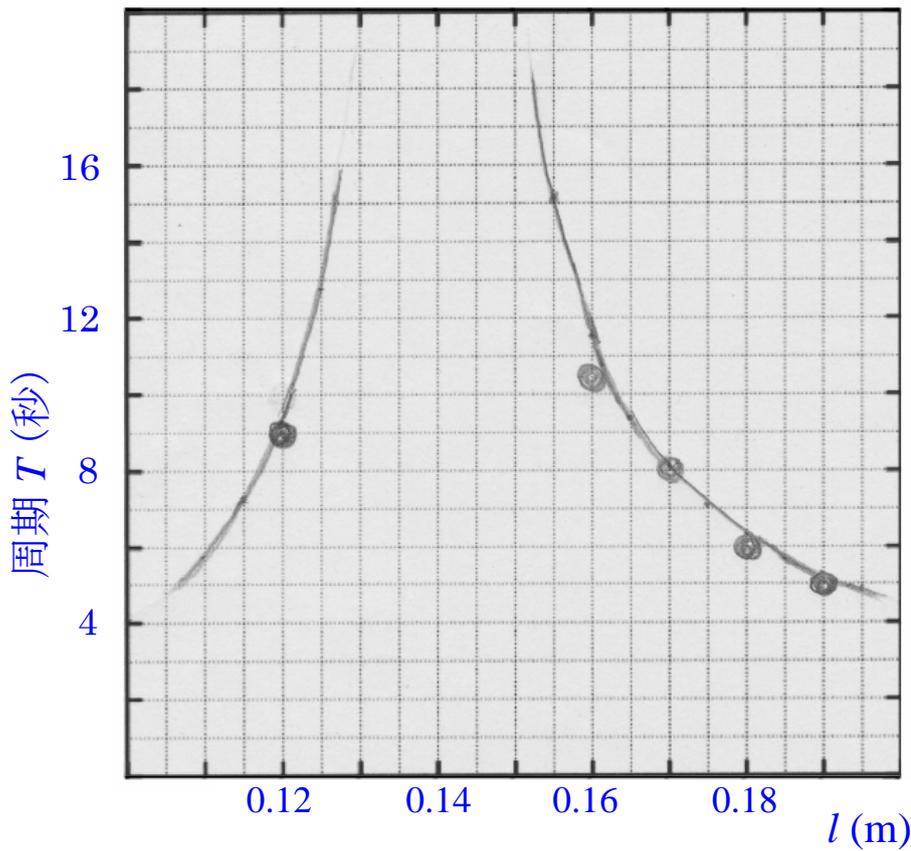
山と山が重なる ↑

↑ 山と谷が重なる

第2チャレンジ番号	氏名

課題2-4 (3)

5
点



(2)で求めたうなりの周期(曲線)と実測(黒丸)の値はほぼ一致した。

課題2-6 (1)

支点の初期位置	(c)
---------	-----

5
点

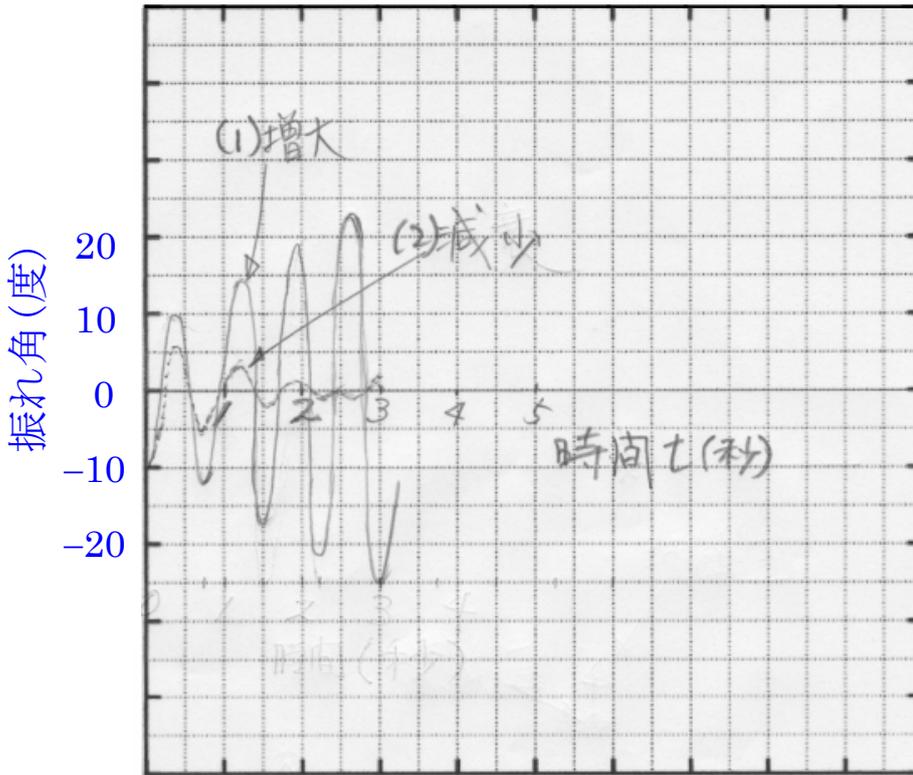
課題2-6 (2)

支点の初期位置	(d)
---------	-----

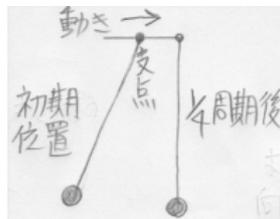
5
点

課題 2-6 (3)

10
点



(1) 振幅増大時：
おもりに働く張力の水平成分と同じ向きに支点が動いている。



(2) 振幅減少時：
おもりに働く張力の水平成分と逆の向きに支点が動いている。



課題 2-6 (4)

5
点

おもりに働く張力の水平成分が弱まる（強くならない）方向に支点を動かせば良い。すなわち、荷物が真下を通過するとき荷物の動く方向にクレーンを動かす。

第2チャレンジ番号	氏名

課題3-2 (1)

15
点

	l_s	$2l_s$	$3l_s$	$4l_s$	$5l_s$
長さ(m)	0.140	0.281	0.421	0.561	0.701
振幅(度)	~10	~10	~10	~40	~10

$l_r = 0.561 \text{ m}$	$f_r = 0.67 \text{ Hz}$
-------------------------	-------------------------

課題3-2 (2)

5
点

おもりに働く糸の張力の水平成分はおもりの振動数と同じ振動数で増減している（向きが変わる）のに対して、おもりに働く張力（の鉛直成分）はおもりの振動数の2倍の振動数で増減するから。

(白紙)

これよりチャレンジ問題：

第2チャレンジ番号	氏 名

課題3-4 (1)

$$f_r = 0.67 \text{ Hz}$$

点

Δl (m)	0.020				
Δf (Hz)	-0.012				
うなりの 周期 (s)	45				

課題3-4 (2)

点

振動数 $f = f_r + \Delta f$ の振り子の N 周期分の時間がうなりの周期 T であるとすると、この間に糸長は振動数 $f_s = 2f_r$ で $2N \pm 1$ 周期だけ振動する。
したがって、

$$T = \frac{N}{f} = \frac{2N \pm 1}{f_s} = \frac{2N}{2f} = \frac{1}{|f_s - 2f|} = \frac{1}{|2f_r - 2(f_r + \Delta f)|} = \frac{1}{2|\Delta f|}$$

$\Delta f = 0.012 \text{ Hz}$ を代入すると、 $T = 1/(2 \times 0.012) = 42 \text{ s}$ となり、実測値 45 s とほぼ一致する。
この関係式は、課題2-4 (2) で求めた公式 $T = 1/|\Delta f|$ とは2倍異なる。

課題 3-6 (1)

最も大きく増大	(d)
最も大きく減衰	(c)

点

課題 3-6 (2)

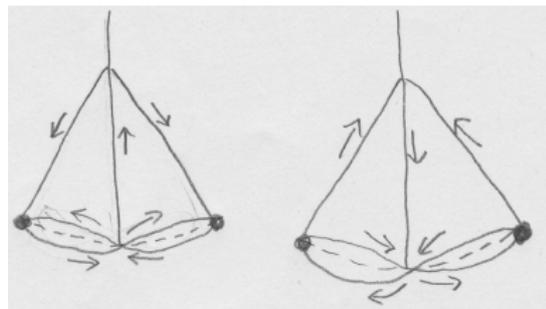
点

おもりが真下に来た (振れ角 0 の) とき、速度が最大となり、遠心力により糸の張力も最大となる。

張力が最大(最小)のとき糸を短く(長く)すると、1周期の間におもりに対して正の仕事をするので振幅は増大し、逆に、張力が最大(最小)のとき糸を長く(短く)するとおもりに対して負の仕事をするので振幅は減少する。

(1) 振幅増大時

(2) 振幅減少時



課題 3-6 (3)

点

ブランコでは、糸の伸縮の代わりに重心を上下させて仕事をする。
真下に来た (振れ角 0 の) とき、立ち上がり、振れが最大のときにしゃがめば振幅を増大させることができる。