

物理チャレンジ 2022  
実験問題  
2022 年 8 月 23 日 (火)

試験時間	13:20 ~ 18:20
実験器具後片付け	18:20 ~ 18:30

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、実験問題別冊、解答用紙、下書き用紙、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全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、3 ページに記載の物理量の表記法に関する注意事項を読みなさい。続いて 3 ページ以降に記載されている器具・部品一覧により、全ての物品を確認しなさい。
4. 実験問題には課題 1 と課題 2 があり、どちらからはじめてもよい。
5. 持参した筆記用具と、与えられた実験装置、部品、定規、電卓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. 解答用紙にグラフを描く場合、解答用紙に方眼が印刷されている場合はその方眼に描くこと。方眼紙を貼り付けるように指示されている場合は、グラフを方眼紙に描き、解答欄に合わせてはさみで切り、両面テープでしっかり貼ること。万一はがれたときのために、表面あるいは裏面に、必ずチャレンジ番号と氏名を書くこと。方眼紙が不足した場合は番号札を通路側に出して監督者に申し出ること。
8. 実験中に部品を壊した場合には、1 回だけ新しいものと交換できるので、番号札を通路側に出して監督者に申し出ること。2 回以上同じ部品を壊した場合には、さらに新品と交換できるが、減点となる。ただし、数には限りがあるので、交換できない場合もある。
9. 試験開始後から 16:40 までは途中終了（途中放棄）することはできない。
10. 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、試験を途中終了するときには、番号札を通路側に出して監督者に知らせること。
11. 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、3 ページ以降に記載の部品リスト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。

## 目次

物理量の記法に関する注意事項	3
器具・部品一覧	3
アルミフレームの組み立て方	8
課題1 振り子の周期測定	9
課題2 波の干渉—基本的な現象とその利用法—	25
オシロスコープの使い方	別冊

### 物理量の記法に関する注意事項

物理量の値は、単位とする大きさを表す記号と、その何倍であるかを表す数値の積として表記される。今回の物理チャレンジの実験課題では、国際単位系（SI）で推奨されている記法に従い、以下のような記法を用いる。

物理量の値を表すときには単位をつける。このとき、単位をカッコなどで囲わない。例えば、「自転車の速さは $v = 18 \text{ m/s}$ である。」と書き、 $v = 18 (\text{m/s})$ とか $v = 18 [\text{m/s}]$ などとは書かない。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、 $X / U$  と記し、そこに現れる数値が単位  $U$  で表した物理量  $X$  の数値であることを明示する。例えば、表やグラフに電流  $I$  を  $\text{mA}$  単位で表したい場合には、見出し欄や座標軸に  $I / \text{mA}$  と書けばよい。なお、一般に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。

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

### 器具・部品一覧

机上の物品を点検し、表の後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。オシロスコープの使用しない部品類はオシロスコープの箱の中に入れておくこと。

### 課題 1,2 に共通する部品

番号	品名	内容	数量	包装	確認
1	ボールポイント六角棒ドライバー	M5 用	1		
2	アルミフレーム用ナット	M5 (予備)	5	袋 C	
3	アルミフレーム用六角穴付ボルト	M5 (含予備)	9	袋 C	
4	はさみ		1		
5	プラスチック定規	50 cm	1		
6	三角定規	18 cm	1 組		
7	巻き尺	3 m	1		
8	方眼紙	A4	数枚		
9	両面テープ		1		
10	セロハンテープ		1		
11	関数電卓		1	箱の外	



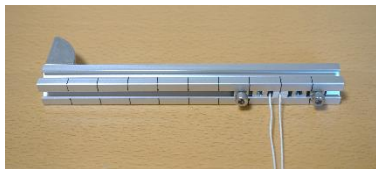
1 ボールポイント六角棒ドライバー



2 アルミフレーム用ナット 3 アルミフレーム用六角穴付ボルト

**課題 1 の部品**

番号	品名	内容	数量	包装	確認
1	アルミフレーム A	長さ 20 cm, ボルト, ナット, 糸, ブラケット付き	1		
2	アルミフレーム B	長さ 40 cm, 糸固定用ねじ, 棒支持用厚紙付き	1		
3	アルミフレーム C	H 型, ブラケット付き	1		
4	アルミフレーム D	四辺形, 52 cm×15 cm, くぼみ先ねじ付き	1		
5	アルミフレーム E	長さ 20 cm, ブラケット付き	2		
6	ヒノキ丸棒 A	長さ 43 cm	1		
7	ヒノキ丸棒 B	長さ 26 cm	1		
8	おもり A	真鍮製 直径 18 mm, 高さ 20 mm	1	袋 A	
9	おもり B	真鍮製 直径 30 mm 高さ 20 mm	1	袋 A	
10	回転子		1	袋 A	
11	六角レンチ	おもり・回転子固定用	1	袋 A	
12	木片	18 cm×9 cm×1.9 cm	1		
13	両口スパナ	7 mm, 8 mm	1	袋 A	
14	ストップウォッチ		1		



1 アルミフレーム A



2 アルミフレーム B



4 アルミフレーム D



3 アルミフレーム C



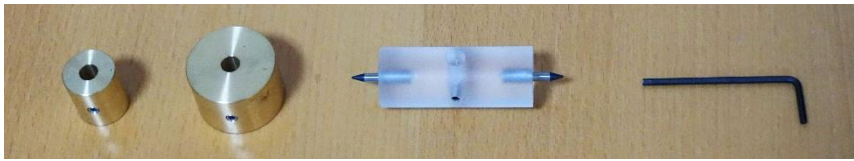
5 アルミフレーム E



6 ヒノキ丸棒 A



7 ヒノキ丸棒 B



8 おもり A

9 おもり B

10 回転子

11 六角レンチ



12 木片



13 両口スパナ



14 ストップウォッチ

**課題 2 の器具・部品**

番号	品 名	内容	数量	包装	確認
1	オシロスコープ	OWON社 SDS5032E型	1 台	専用箱	
2	ワンボードコンピュータ	ARDUINO	1 個	小箱入	
3	乾電池（スナップ付き）	6P 型（9 V）	1 個	袋 B	
4	ジャンパー線（オスーオス）		4 本	袋 B	
5	ブレッドボード		1 個	袋 B	
6	同軸ケーブル（BNC コネクタ付き）		1 本		
7	スピーカー（スタンド付き）	右型, 左型 各 1	2 個		
8	マイク（スタンド付き）		1 個		
9	マイクの足（ブラケット付き）	アルミフレーム	1 個		
10	固定衝立（8 cm 穴, フレーム付き）	アクリル板	1 個		
11	固定衝立の足（ブラケット付き）	アルミフレーム	1 個		
12	可動衝立（8 cm 穴, フレーム付き）	アクリル板	1 個		
13	可動衝立の足（蝶ナット付き）	アルミフレーム	1 個		
14	レール（送りネジ付き）	アルミフレーム	1 個		
15	スプリング		2 本	袋 B	
16	穴あき金属板（3 mm 穴, 5 mm 間隔）	10 cm 角	2 枚		
17	目玉クリップ		1 個		
18	ラップ（食品包装用フィルム）		1 巻		
19	段ボール板	A4	4 枚		

課題2で使用する器具・部品の写真（1から16まで）



1 オシロスコープ



2 ワンボードコンピュータ (ARDUINO, 小箱入り)



3 乾電池 (6P型9V  
スナップコネクタ付き)



4 ジャンパー線  
(4本, 色は様々)



5 ブレッドボード



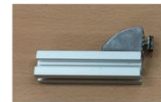
6 同軸ケーブル (BNCコネクタ付き)



7 スピーカー (左型) スピーカー (右型)



8 マイク (BNCコネクタ付き)



9 マイクの足

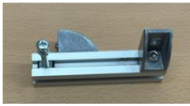


アクリル板が  
3mmはみ出している

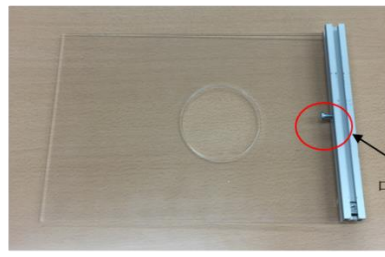
10 固定衝立



11 固定衝立の足



13 可動衝立の足



中央にネジ

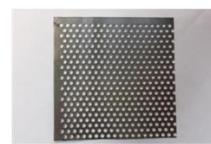
12 可動衝立



14 レール



15 スプリング(2個)



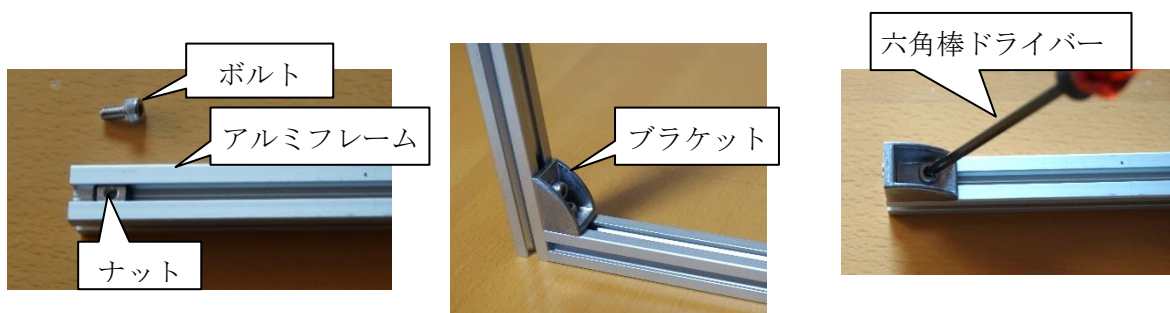
16 穴あき金属板 (2枚)

(17以下の写真は省略)

### アルミフレームの組み立て方

課題 1, 課題 2 ともアルミフレームが使われている。ほとんどのアルミフレームはすでに組み立てられているが、一部は組み立てる必要がある。

アルミアルミフレームの溝にはあらかじめナットが入っている。このナットは溝の中を移動させることができる。2 本のアルミフレームを結合させるにはブラケットを使用する。ブラケットの穴とナットの穴を一致させてボルトを挿入し、六角棒ドライバーを使って締め付ける。六角棒ドライバーは図のように斜めにして回すこともできる。



輸送の途中でナットが外れている可能性もあるので、その場合は予備のナットを溝に入れる。



### 【安全上の注意】

アルミフレームの角は鋭いので、アルミフレームを扱う場合には、こすったりぶつけたりしないこと。



## 実験課題 1：振り子の周期測定

注：以下の間で数値計算に重力加速度の大きさの値が必要な場合は、 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$  としなさい。

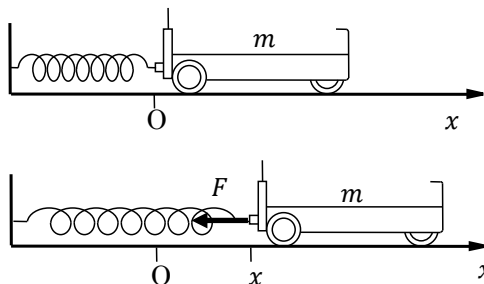
### 【実験の目的】

2種類の振り子について周期を測定し、理論モデルから得られる周期との比較を行う。

### 【解説】

#### 単振動

台車がばねにつながれている。ばねが自然な長さの状態から、台車を手で少し移動させて手を離すと台車は振動する。



ばねが自然な長さの状態

ばねが自然な長さから  $x$  だけ伸びた状態

図 1-A

ばねが自然な長さから  $x$  だけ伸びた状態のとき、ばねは物体に対し、変位に比例して変位と逆向きの力  $F = -kx$  ( $k$ は比例定数)をおよぼす。このような力を受ける物体の振動を単振動という。物体の質量を  $m$  とすると、単振動する物体の運動方程式は

$$ma_x = -kx \quad (1-1)$$

となる。単振動の周期は次のようになることが知られている。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (1-2)$$

#### 単振り子

図 1-B のような単振り子の周期を考える。糸の長さを  $l$ 、おもりの質量を  $m$ 、重力加速度の大きさを  $g$  とする。糸が鉛直線となす角が  $\phi$  のとき、重力の、運動方向（円周の接線方向）の成分の大きさは  $mg \sin \phi$  である。おもりの加速度の接線成分を  $a_t$  とすると、おもりの接線方向の運動方程式は次のようになる。

$$ma_t = -mg \sin \phi \quad (1-3)$$

おもりの最下点を原点とし、円周の接線方向に  $x$  軸を取る。おもりの振れ角  $\phi$  が十分に小さい場合、おもりの運動は  $x$  軸への正射影の運動で近似することができる。 $a_t \approx a_x$ 、 $x = l \sin \phi$  であるから、おもりの運動方程式 (1-3) は次のように書き替えられる。

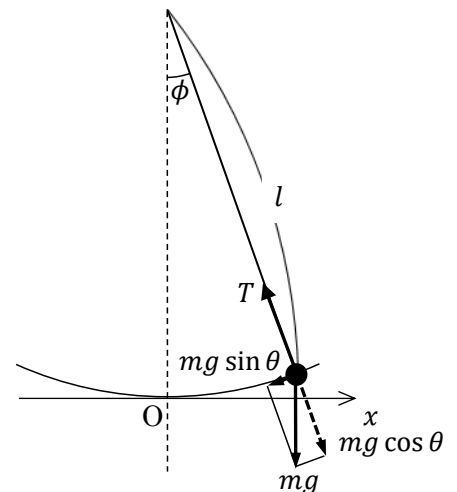


図 1-B

$$ma_x = -\frac{mg}{l}x \quad (1-4)$$

式 (1-4) を式 (1-1) と対比することにより、振れ角の小さい単振り子は単振動を行い、その周期は次のように表されることがわかる。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (1-5)$$

### 課題 1-1 水平振り子

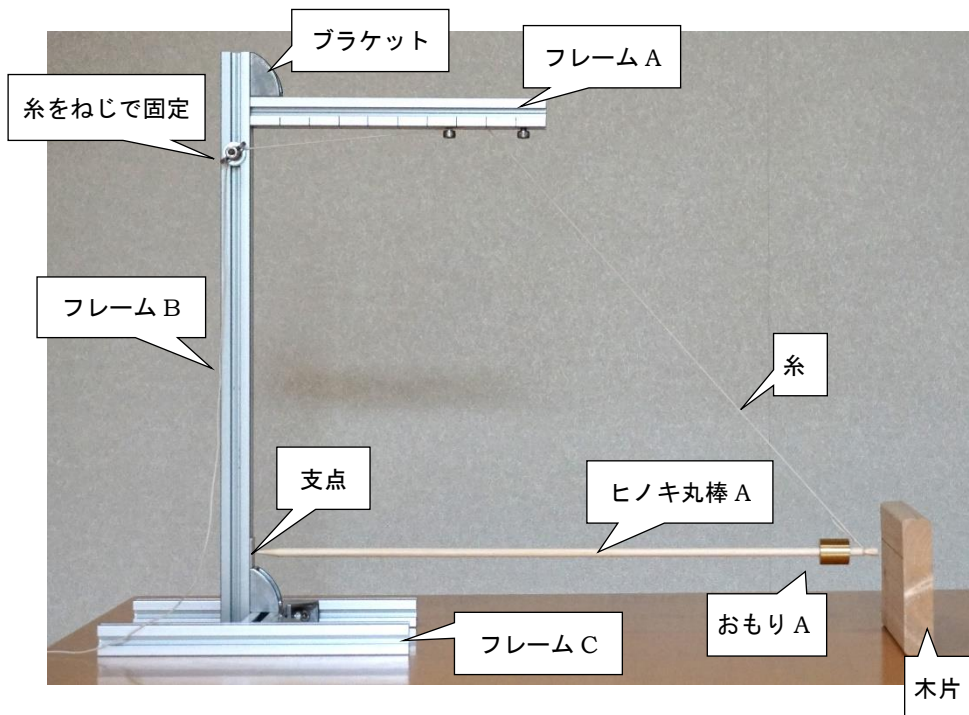
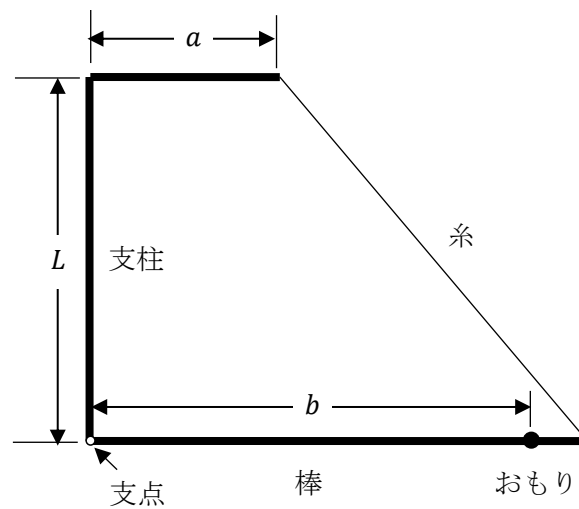


図 1-1 水平振り子の装置の全体写真



$L = 29.0 \text{ cm} = 0.29 \text{ m}$   
 $a, b$  は実験によって  
 変化させる。

図 1-2 水平振り子の模式図

【課題の概要】装置全体の写真を図 1-1 に、その模式図を図 1-2 に示す。おもりの取り付けられた棒は、静止状態では水平に保たれている。棒を手で持ち、つり合いの位置から少しずらして手を離すと、棒は点 O を支点としてゆっくりとした振動を行う。このような振り子を水平振り子という。この課題では、水平振り子を一種の単振り子としてモデル化し、そのモデルの周期を考える。次に  $a$  や  $b$  を変化させて周期を測定し、理論モデルの周期と比較して、モデルの妥当性を考察する。

### 【実験の準備】

1. フレーム A の底面には、図 1-3 のように 2.0 cm おきに目盛り線が描かれ、また  $a$  の長さを変化させるための仕組みである、ボルト、ナット、糸が取り付けられている。糸が通されたナットの隣にある空のナットは、棒を吊り下げる糸がボルト B にぶつからないためのものである。

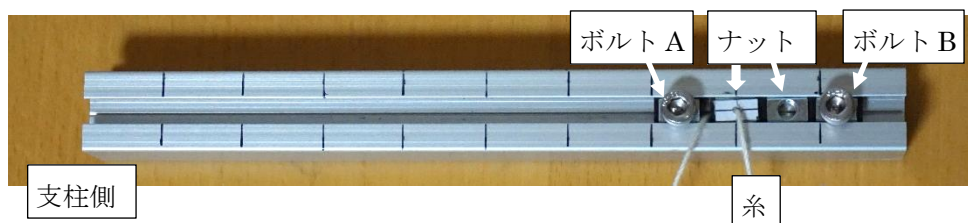


図 1-3 フレーム A 底面

図 1-4 を参考にして、フレーム A の支柱側を、ブラケットの端と支柱の端を一致させるよう、支柱となるフレーム B (長さ 40.0 cm) に取り付ける (図 1-4)。

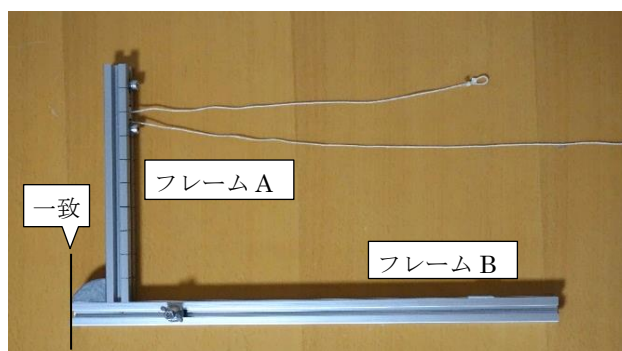


図 1-4 フレーム A と B の取り付け

2. 図 1-1, 図 1-5 を参考にしながら、土台となる H 型のフレーム C に支柱フレーム B を取り付ける。その際、装置全体ががたつかないように支柱の位置を調整する。このように組み立てると、厚紙のくぼみは机から 6.0 cm の高さに、また図 1-2 の  $L$  (棒の支点からフレーム A の下端までの距離) は 29.0 cm になる。

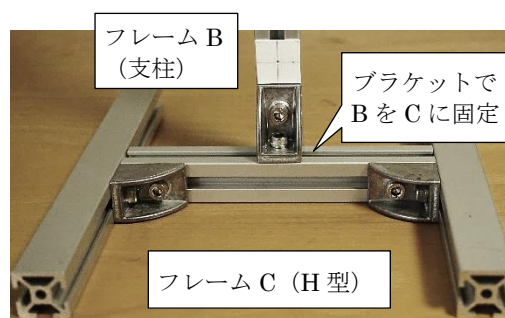


図 1-5 フレーム B のフレーム C への取り付け

3. フレーム A 底面の目盛り線を見て、 $a$  (支柱から糸の吊り下げ位置までの距離) が 16.0 cm になるようにナットを移動し、2 本のボルトを手で締める (図 1-6 参照)。糸の長さの調節がスムーズにできるように、ボルト A が付いているナットと、糸が付いているナットとの間隔をつめすぎないように注意する。

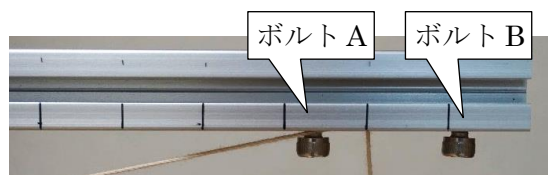


図 1-6 糸の吊り下げ部分 ( $a=16.0$  cm)

4. ヒノキ丸棒 A のとがっている方を A 端、とがっていない方を B 端とする。B 端の近くには糸を掛けるための溝が付けられている。棒には 3 本 1 組の線が 5.0 cm 間隔で引かれている。各組の中央の赤い線はおもりの中心を、両端の黒い線はおもりの両端の位置を示すためのものである。棒におもり A (小さい方) を通し、おもりの中心が棒の A 端から 40.0 cm の位置にくるように (すなわち、おもりの両端が、40.0 cm の位置に引かれた赤線の両隣の黒い 2 本の線に一致するように) 六角レンチで固定する。ねじはあまり固く締め付けすぎないこと。これで  $b=40.0$  cm になる。

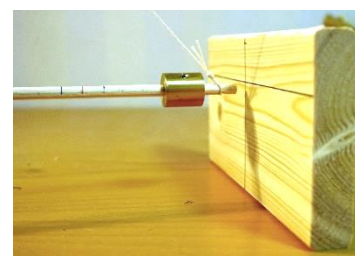


図 1-7 ヒノキ丸棒 A

5. 図 1-1 を参考にして、棒の B 端の方にある溝に糸の輪を通す。次に図 1-8 に示すように、支柱に貼り付けた厚紙の十文字の中心にあるくぼみ部分に、棒の A 端を当てて支持し、棒が水平になるように糸の長さを調整する。糸は支柱に取り付けた 2 枚のワッシャーの間に通して、蝶ナットを手で回して固定する (図 1-9(a))。棒を水平にするためには、図 1-9(b)のように棒の B 端近くに木片を置き、棒の上端が、木片に引かれた水平線 (線は下から 6.3 cm の位置に引かれている) と同じ高さになるように糸の長さを調整する。このとき、棒の A 端がくぼみから外れないように注意すること。どうしても外れてしまう場合は、監督者を呼びなさい。



図 1-8 A 端の支持方法



(a)

(b)

図 1-9 棒を水平にする方法

## 振動モデルの推定

図 1-1 のように装置が組みあがったら、棒の B 端を手で押して棒をつり合いの位置から横に少しだけずらして手を離しなさい。おもりがゆっくりと振動することが確認できるはずである。このおもりは、ある直線を回転軸とし、回転軸に垂直な平面（振動面）上で、回転軸上に中心をもつ円弧に沿って振動している。この回転軸と振動面を見つけてみよう。

図 1-10 を参考にして、手で棒を大きく振らせる。このとき、棒の A 端を手で支えるが、A 端がくぼみからすこしくらい外れても構わない。このように棒を大きく振らせたときの、おもりの動いた軌跡がおもりの振動面である。この振動面はおもりの位置  $b$  によって異なるが、回転軸は、糸を吊るす位置  $a$  が変わらない限り変わらない。

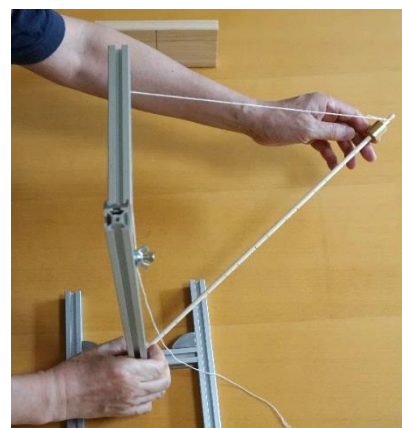


図 1-10 棒を大きく振らせる  
(装置を上から見る)

問 1-1 図 1-11 に示すように  $x$  軸,  $y$  軸を定める。おもりの回転軸および振動面を  $xy$  平面に正射影した図を解答用紙に記入しなさい。

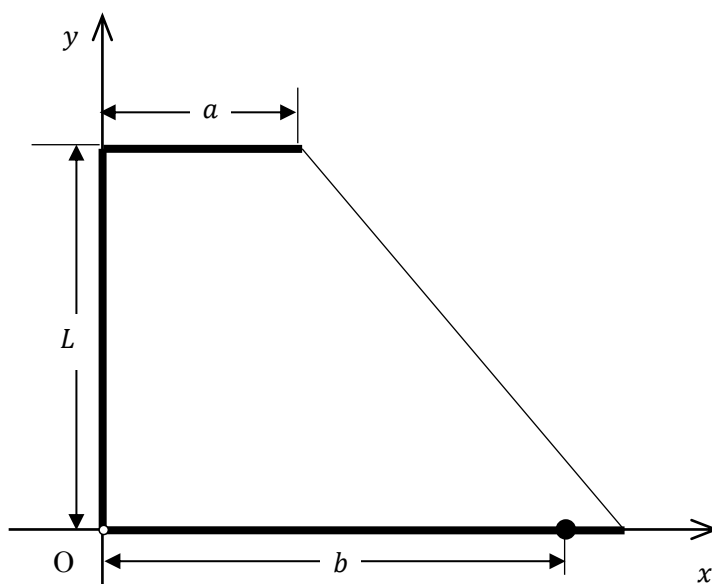


図 1-11 座標軸の設定

振動するには、つり合いの位置からずれたときに元の位置に戻そうとする復元力が必要である。棒および重力がおもりに力をおよぼしているが、棒がおもりにおよぼす力は運動を束縛する力であり、おもりをもとの位置に戻そうとするはたらきはない。したがって復元力の原因となる力は、重力のみである。

問 1-2 おもりの振動の振幅が小さければ、この振動は振幅が小さい場合の単振り子と同様な単振動になる。先ほど推定した回転軸および振動面を考慮して振動のモデルを考え、周期の式を求めなさい。周期は図 1-11 で使われている文字、おもりの質量  $m$ 、重力加速度の大きさを  $g$  のうち、必要なものを使って表しなさい。なお、棒の質量は無視でき、おもりは点とみなせるとして考えなさい。

### 振動の周期の測定

棒を支点から外し、棒を支えている糸も外しなさい。フレーム A の 2 つのボルトを緩めて、 $a=10.0$  cm の位置までナットを移動し、ボルトを締めて固定しなさい。次に棒に取り付けられたおもりを  $b=20.0$  cm の位置まで移動し、固定しなさい。糸の輪を棒の B 端に通し、棒の A 端を厚紙のくぼみに当て、棒のそばに木片を置いて棒が水平になるように糸の長さを調整しなさい (図 1-9 参照)。棒が静止した状態で、棒の B 端が木片に書かれた十字線の鉛直線に位置にくるように、また棒が振動したとき木片に当たらないように、木片を配置しなさい。木片に書かれた鉛直線は、周期測定の際の目印である。

以下の問 1-3 および問 1-5 では振動の周期の測定を行う。棒の B 端が木片の長辺の端に来るような位置から振動を始めなさい。振動の往復回数は、振動の減衰を考慮して適切な数になるように設定しなさい。測定はそれぞれ 3 回ずつ行い、それらの平均値から周期を求めなさい。

問 1-3 棒を振動させて、周期を測定し、解答用紙に記入しなさい。次に  $a$  は固定したまま、おもりが  $b=25.0$  cm,  $30.0$  cm,  $35.0$  cm,  $40.0$  cm の位置のときの周期を測定し、解答用紙に記録しなさい。おもりを移動する際は、棒を支点から外し、糸も棒から外しなさい。おもりの位置によって糸が伸び縮みするので、おもりの位置を変えるたびに棒の水平を微調整しなさい。振動中に棒が支点から外れてしまう場合は、監督者を呼びなさい。

問 1-4 問 1-2 で考えたモデルにしたがって周期を計算し、解答用紙の該当する位置に記入するとともに、実測値と計算値との相対的な差 ( $(\text{実測値} - \text{計算値}) / \text{計算値}$ ) を求め、百分率 (%) で記入しなさい。さらにグラフを作成しモデルの妥当性を検討しなさい。妥当性を検証するためにはどのようなグラフを書けばよいかを考えなさい。もし、測定した周期がモデルの周期と大幅に異なる場合は、新たなモデルを考え、周期の式を考えなさい。さらに必要ならば別紙の方眼紙に新たなグラフを作成してモデルの妥当性を検証しなさい。新たにグラフを作成した場合は方眼紙を適当な大きさに切って、解答用紙 5 に貼り付けなさい。

棒を支点から外し，棒を支えている糸も外しなさい。おもりを  $b=20.0\text{ cm}$  の位置に移動し固定しなさい。次に  $a=4.0\text{ cm}$  の位置までナットを移動し固定しなさい。先ほどと同様，棒を糸で吊るし，A 端を厚紙のくぼみに当てて，棒が水平になるように調整しなさい。

問 1-5 振り子を振動させて，周期を求めなさい。次に， $b$  は固定したまま， $a=8.0\text{ cm}$ ， $12.0\text{ cm}$ ， $16.0\text{ cm}$  のときの周期を測定し，解答用紙に記入しなさい。 $a$  の値を変更するたびに，棒を支点から外し，糸も棒から外しなさい。 $a$  の値の変更後は棒の水平を調整しなさい。振動中に棒が支点から外れてしまう場合は，監督者を呼びなさい。

問 1-6 モデル（モデルを修正したなら，そのモデル）にしたがって周期を計算し，解答用紙の該当する位置に記入するとともに，実測値と計算値との相対的な差（ $(\text{実測値}-\text{計算値})/\text{計算値}$ ）を求め，百分率（%）で記入しなさい。さらにグラフを作成しモデルの妥当性を検討しなさい。妥当性を検証するためにはどのようなグラフを書けばよいかを考えなさい。

課題 1-1 が終了したら糸を棒から外し，おもりを棒から外しておきなさい。

## 課題 1-2 実体振り子

【課題の概要】 装置全体の写真を図 1-12 に、その模式図を図 1-13 に示す。図 1-12 の  $m_1$  はおもり A の質量、 $m_2$  はおもり B の質量を表す。図 1-12 のような装置を組み立て、おもりのついた棒を振動させる。

大きさのある物体で、外力によって変形しないものを剛体という。この写真に示されたような、棒に 2 つのおもりが付けられた物体は剛体とみなせる。剛体が水平な固定軸（空間に固定された回転軸）のまわりに回転でき、重力のみがはたらいて振動する振り子を「実体振り子」という。この課題では、実体振り子の周期を測定し、周期に最小値が現れることを確かめるとともに、その物理的意味を考察する。

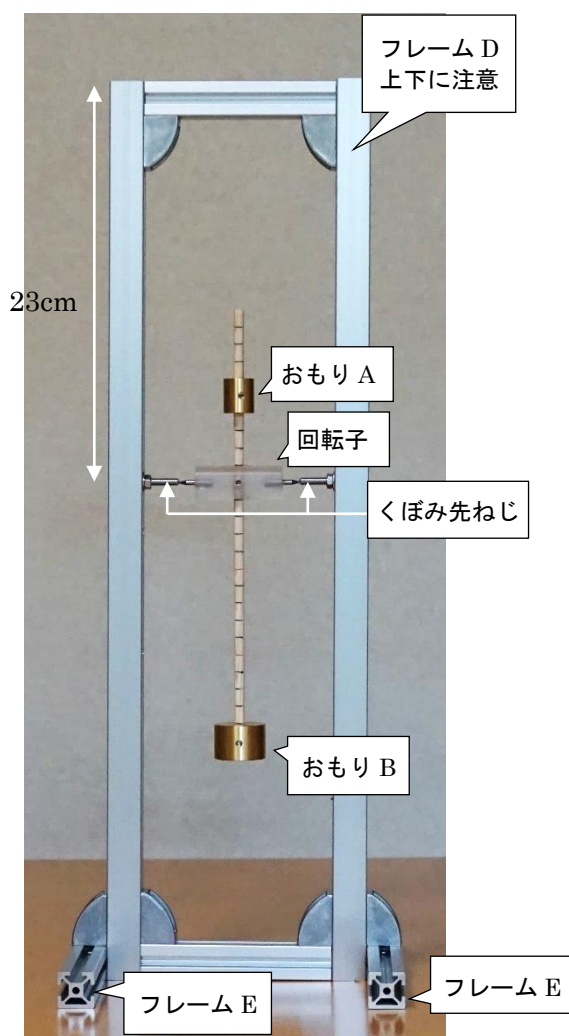


図 1-12 実体振り子装置の全体写真

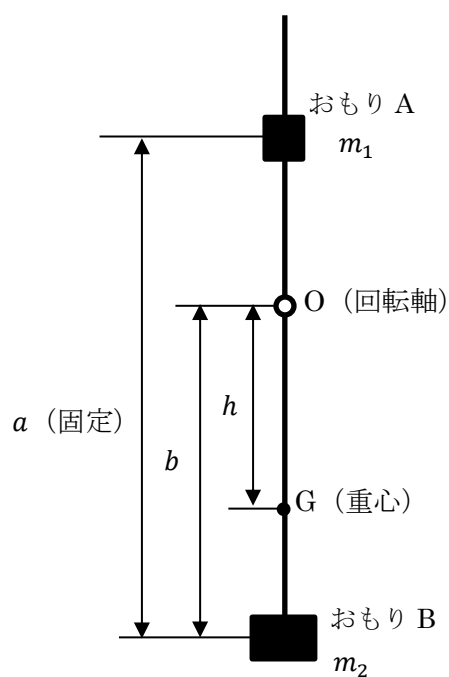
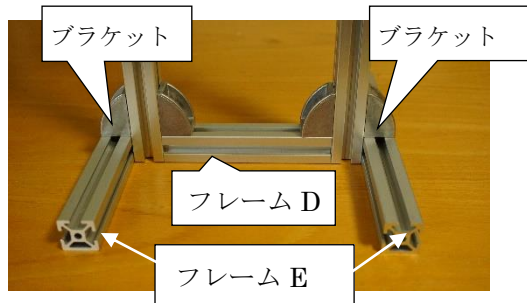


図 1-13 実体振り子の模式図

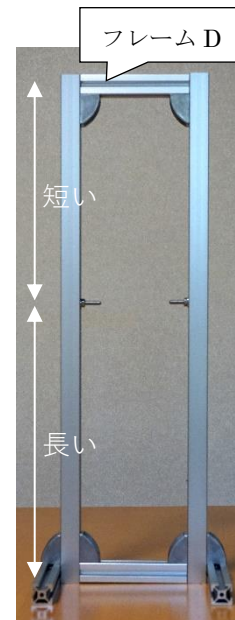


### 【実験の準備】

1. 図 1-12 に示すように、四角いフレーム D には、上から 23.0 cm の位置に回転子を取り付けるためのくぼみ先ねじが取り付けられている。フレーム D の上下に注意しながら、長さ 20 cm のフレーム E (2 本) をフレーム D にブラケットで取り付け、装置の支持台とする (図 1-14)。



(a) フレーム D と E の接続



(b) 組み立て完成図

図 1-14 フレーム D のフレーム E への取り付け

2. 長さ 26 cm のヒノキ丸棒 B には、図 1-15 に示すように 5.0 cm ごとに赤い線が、その間には 1.0 cm ごとに黒い線が引かれている。おもりの高さは 2.0 cm、回転子の直径は 2.0 cm であり、棒におもりや回転子を固定するように指示するときの値は、それぞれの中心の位置を示している。したがって、実際に取り付けるときには、指示された位置の前後 1.0 cm につけられた線を目印にする。

図 1-15(a) のように、棒の端から 1.0 cm のところに赤い線が引かれた方を左にして置く。図 1-15(b) のように、大きい方のおもり B を棒の左側から通して、棒の端から 1.0 cm の位置に六角レンチで固定する。これでおもりの端と棒の端とが一致するはずである。

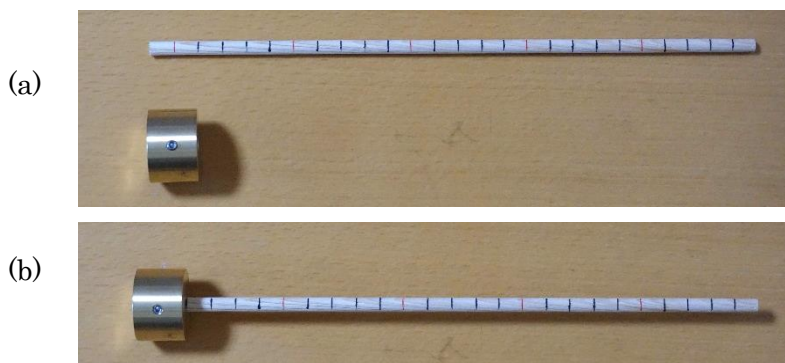


図 1-15 ヒノキ丸棒 B とおもり B ((a) おもりを付ける前 (b) 付けた後)

3. 小さい方のおもり A（課題 1-1 で使用したもの）を棒に通し，図 1-13 の  $a=20.0$  cm の位置に固定する（図 1-16(a)）。
4. 棒を回転子に通し，図 1-13 の  $b=24.0$  cm の位置<sup>(注)</sup>に回転子を六角レンチで固定する。回転子の両側にねじが付いているが，どちらか片方のねじだけを締めればよい（図 1-16(b)）。

(注) 図 1-16(b)の回転子の位置は図 1-12 とは異なり，おもり A の上にあるが，問 1-7 で指示するように，この位置は次第に下の方へ移動していく。

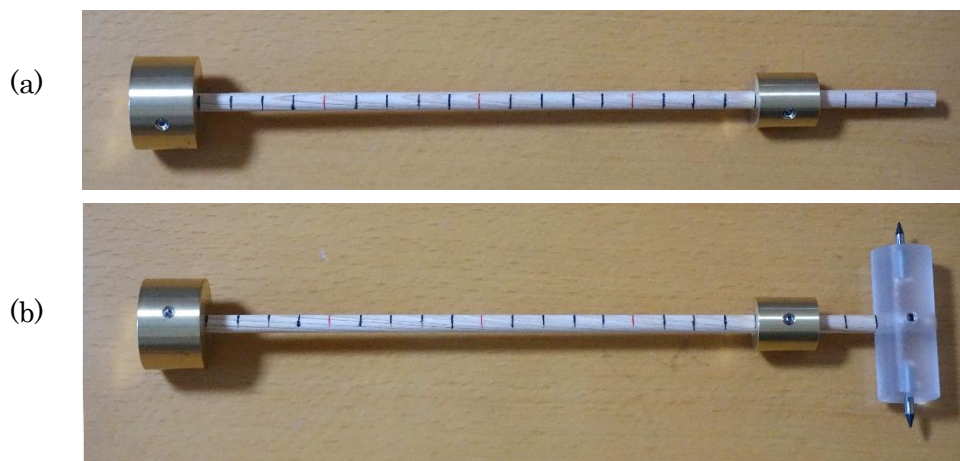


図 1-16 (a) おもり A を取り付けた状態 (b) 回転子を取り付けた状態

5. フレーム D にくぼみ先ねじ（先端のくぼんだねじ）を取り付けているナットをスパナ（8の数字が付いている方）で少し緩め，くぼみ先ねじを回して回転子を 2 本のくぼみ先ねじの間に入れる。回転子が固定され，なおかつ自由に回転できるように，手でくぼみ先ねじを回してねじ間の距離を調整する。ねじで回転子を締め付けすぎるとスムーズな振動ができなくなるので，ねじのくぼみと回転子の軸先との間に多少の余裕を持たせること。振り子を振動させて 10 回以上振動することを確認できたら，スパナでナットを回してねじの位置を固定する（図 1-17）。

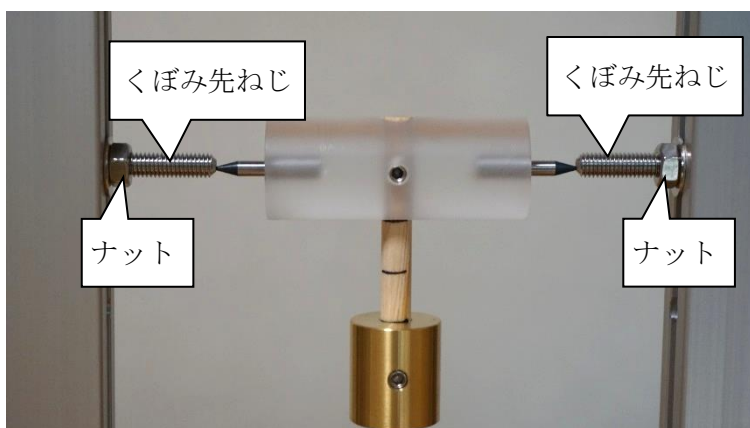


図 1-17 回転子の支持部

この課題 1-2 では、棒と回転子の質量は無視でき、おもりは点とみなせるとして考えなさい。

問 1-7, 問 1-8 では周期を測定する。振動が 10 往復する時間を測定し、解答用紙に記入する。測定はそれぞれ 3 回ずつ行い、それらの平均値から周期  $T$  を求める。

#### 問 1-7

$b=24.0$  cm の位置で周期を測定し、解答用紙に記入しなさい。回転子のねじを緩めて棒を移動し、解答用紙にあるように、 $b$  の値を 22.0 cm から 8.0 cm まで 2.0 cm ごとに変化させて周期  $T$  を測りなさい。 $b=22.0$  cm まで測定したら、いったん棒を回転子から外し、おもり A を外しなさい。次に棒を回転子に通して  $b=18.0$  cm の位置に固定し、おもり A を再び  $a=20.0$  cm の位置に固定して測定を再開しなさい。

周期測定の日印として、フレームのわきに開けられた穴を利用するとよい。

解答用紙の表をもとに、 $T$ - $b$  グラフ ( $T$  が縦軸、 $b$  が横軸のグラフ) を作成しなさい。

#### 問 1-8

このグラフから、周期が最小になると推定される位置を中心に、 $b$  の値を 1.0 cm ごとに変化させて 5 か所で周期を測定し、解答用紙に記入しなさい。解答用紙の表をもとに、 $T$ - $b$  グラフを作成し、周期が最小となるときの  $b$  の値およびそのときの周期  $T$  を求めなさい。

#### 問 1-9

なぜ周期に最小値が現れたかを考察しなさい。

ヒント: 回転軸が重心に近づいていったとき、および重心からどんどん遠ざかっていったとき、周期はどうなるかを考えなさい。

一般に, 実体振り子の周期はつぎの式で表される(導出過程は 22 ページ以降の付録を参照)。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{k_0^2 + h^2}{gh}} \quad (1-6)$$

$k_0$ : 重心 G を通り回転軸 O と平行な軸のまわりの回転半径<sup>(注)</sup>

$h$ : 回転軸 O と重心 G までの距離

(注) 「回転半径」の意味は 23 ページに記載してある。

今回の実体振り子の場合,  $k_0$  と  $h$  は次のようになる。

$$k_0 = \frac{\sqrt{m_1 m_2}}{m_1 + m_2} a \quad (1-7)$$

$$h = b - \frac{m_1}{m_1 + m_2} a \quad (1-8)$$

2つのおもりの間隔  $a$  は固定されているので式 (1-7) より  $k_0$  は定数となる。一方, 回転軸から重心までの距離  $h$  は式 (1-8) に示すように変数  $b$  の関数となる。

#### 問 1-10

これらのことから, 周期が最小になるときの  $h$  は

$$h = k_0 \quad (1-9)$$

であり, そのときの周期  $T$  は次のようになることを示しなさい。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{2k_0}{g}} \quad (1-10)$$

ヒント: 周期が最小になる  $b$  を求めるには, 式(1-6)の平方根内が最小になればよい。平方根内の変数は  $h$  のみであるから, 相加平均と相乗平均の関係, すなわち「 $a > 0, b > 0$ ならば  $(a + b) \geq 2\sqrt{ab}$ であり, 等号が成り立つのは  $a = b$ の場合である」を使えば最小値を求めることができる。

式(1-7) ~ (1-10) から, 本課題の周期が最小になるときの  $b$ は

$$b = \frac{m_1 + \sqrt{m_1 m_2}}{m_1 + m_2} a \quad (1-11)$$

となり, そのときの周期  $T$ は

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{2\sqrt{m_1 m_2} a}{(m_1 + m_2)g}} \quad (1-12)$$

となる。

2つのおもりの質量比を  $r = \frac{m_2}{m_1}$  とおくと、式 (1-11) (1-12) は次のよう書き換えることができる。

$$b = \frac{\sqrt{r} + 1}{r + 1} a \quad (1-13)$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{2\sqrt{r} a}{(r + 1)g}} \quad (1-14)$$

問 1-11

式 (1-13) (1-14) に、実験で使用した以下の数値を入れ、周期が最小になるときの  $b$ 、およびそのときの周期  $T$  を求めなさい。

$$a = 0.200 \text{ m}$$

$$m_1 = 3.78 \times 10^{-2} \text{ kg}, \quad m_2 = 1.141 \times 10^{-1} \text{ kg}$$

問 1-12

問 1-11 で求めた計算値と問 1-8 で求めた  $b, T$  の値とを比較しなさい。ほぼ一致したといえるか。

### 【付録】実体振り子の周期

9 ページ図 1-B で示した単振り子を、糸がたるまない材質でできた剛体の運動として考える。おもりの回転の角加速度を  $\alpha$  とすると、おもりの接線方向の加速度  $a_t$  は  $l\alpha$  と表すことができるので、おもりの接線方向の運動方程式(1-3)は

$$ml\alpha = -mg \sin \phi \quad (1-15)$$

と書き換えることができる。両辺に  $l$  を掛けると

$$ml^2\alpha = -mgl \sin \phi \quad (1-16)$$

となる。この式の右辺は、回転軸のまわりの重力による力のモーメント（トルク） $N$  を表している。一方左辺の  $ml^2$  は、回転の角速度の変化を妨げる慣性の大きさを表す慣性モーメント  $I$  とよばれる量である。 $N, I$  を用いて式(1-16)を書き換えると

$$I\alpha = N \quad (1-17)$$

となる。式 (1-17) は剛体の回転運動の運動方程式とよばれており、剛体の回転運動一般に成り立つ式である。

本課題の実体振り子の運動方程式を、図 1-18 をもとに考える。このような、おもりが 2 つある実体振り子の運動の運動方程式も式(1-17)の形になる。剛体に重力のみがはたらく場合のトルクは、重心に全質量が集中してそこに重力がはたらくと考えた場合のトルクと同じになる。

$$N = -Mgh \sin \phi \quad (1-18)$$

(ただし、 $M = m_1 + m_2$ )

剛体の慣性モーメントは、剛体を構成する質点の慣性モーメントの和になるので、本課題の実体振り子の回転軸  $O$  のまわりの慣性モーメントは

$$I = m_1 l_1^2 + m_2 l_2^2 \quad (1-19)$$

となる。

振り子の振れ角が小さい場合、 $\sin \phi \approx \phi$  であるから、式(1-18)を利用して運動方程式(1-17)を書き直すと

$$I\alpha = -Mgh\phi \quad (1-20)$$

となり、これを变形して

$$\alpha = -\frac{Mgh}{I}\phi \quad (1-21)$$

となる。

単振り子の振れ角が小さい場合、式(1-15)は  $\alpha = -\frac{g}{l}\phi$  と変形することができる。この式

と式(1-21)とを比較すると、単振り子の  $l$  は実体振り子の  $\frac{I}{Mh}$  に相当する。したがって、

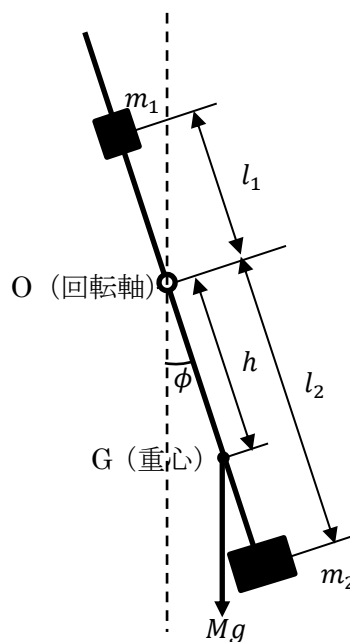


図 1-18 実体振り子

図 1-13 と図 1-18 との対応関係

$$l_1 + l_2 = a$$

$$l_2 = b$$

実体振り子の周期  $T$  は次のようになる。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{Mgh}} \quad (1-22)$$

次に、実体振り子の慣性モーメント  $I$  を、重心のまわりの慣性モーメントと、重心から回転軸までの距離を使って表す。

慣性モーメントの次元は質量×(長さ)<sup>2</sup>であるから、質量  $M$  の剛体の任意の軸のまわりの慣性モーメントは

$$I = Mk^2 \quad (1-23)$$

と書くことができる。 $k$  は注目している軸のまわりの回転半径とよばれる量であり、長さの次元を持つ。

重心は 2 つのおもりの質量の逆比に内分する位置にあるので、重心とおもりとの距離は次のようになる。

$$\text{重心とおもり } m_1 \text{ との距離} : \frac{m_2}{m_1 + m_2} (l_1 + l_2) \quad (1-24)$$

$$\text{重心とおもり } m_2 \text{ との距離} : \frac{m_1}{m_1 + m_2} (l_1 + l_2) \quad (1-25)$$

したがって、重心を通り回転軸と平行な軸のまわりの慣性モーメント  $I_G$  は次のように表される。

$$I_G = \left[ \frac{m_2}{m_1 + m_2} (l_1 + l_2) \right]^2 m_1 + \left[ \frac{m_1}{m_1 + m_2} (l_1 + l_2) \right]^2 m_2 = \frac{a^2 m_1 m_2}{m_1 + m_2} \quad (1-26)$$

(  $l_1 + l_2 = a$  を使った )

重心を通り回転軸と平行な軸のまわりの回転半径を  $k_0$  とすると、 $I_G = Mk_0^2$  であるから

$$k_0 = \sqrt{\frac{I_G}{M}} = \frac{\sqrt{m_1 m_2}}{m_1 + m_2} a \quad (1-27) \quad \leftarrow \text{式 (1-7) に対応}$$

となる。

回転軸から重心までの距離  $h$  は式(1-25)を使って次のように表される。

$$h = l_2 - \frac{m_1}{m_1 + m_2} (l_1 + l_2) = b - \frac{m_1}{m_1 + m_2} a \quad (1-28) \quad \leftarrow \text{式 (1-8) に対応}$$

(  $l_2 = b, l_1 + l_2 = a$  を使った )

質量  $M$  の剛体の任意の回転軸  $O$  のまわりの慣性モーメント  $I$  は,

$$I = I_G + Mh^2 \quad (1-29)$$

となることが知られている (平行軸の定理)。

$I_G = Mk_0^2$  であるから, この実体振り子の慣性モーメントは並行軸の定理を使って,

$$I = Mk_0^2 + Mh^2 = M(k_0^2 + h^2) \quad (1-30)$$

となる。

式(1-30)より, 実体振り子の周期の式(1-22)は次のように書き換えることができる。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{Mgh}} = 2\pi \sqrt{\frac{k_0^2 + h^2}{gh}} \quad (1-31) \quad \leftarrow \text{式 (1-6) に対応}$$



## 実験課題 2 波の干渉 — 基本的な現象とその利用法 —

### 【実験の目的】

光は進行方向に垂直に振動する電場と磁場の作る横波である。一方、音波は分子の集団的な振動が波として伝わっていくものであり、振動の方向が波の進行方向に平行なので縦波である。圧力の波と考えても良い。このように両者の物理的な内容に違いはあるが、波としての性質は共通している部分も多い。この課題では、音波を使って波の基本的な特性を学習し、波の干渉に基づく現象を体験する。光の干渉はレーザー共振器、光周波数コム、重力波アンテナなど最先端の科学技術にも応用されている。

### 【実験セットの概要】

本課題では、干渉という現象に焦点をあて、音波を使って波動の振舞いを調べる。ヒトの耳では、振動数（周波数）がおおよそ 20～20 000 Hz の範囲の音しか感じることができないと言われているが、ここではもっと振動数が高い（波長の短い）「超音波」を使用する。その理由は、波長が実験セットのサイズに比べて十分に短くないと、干渉という現象を観察するのが困難であるからである。

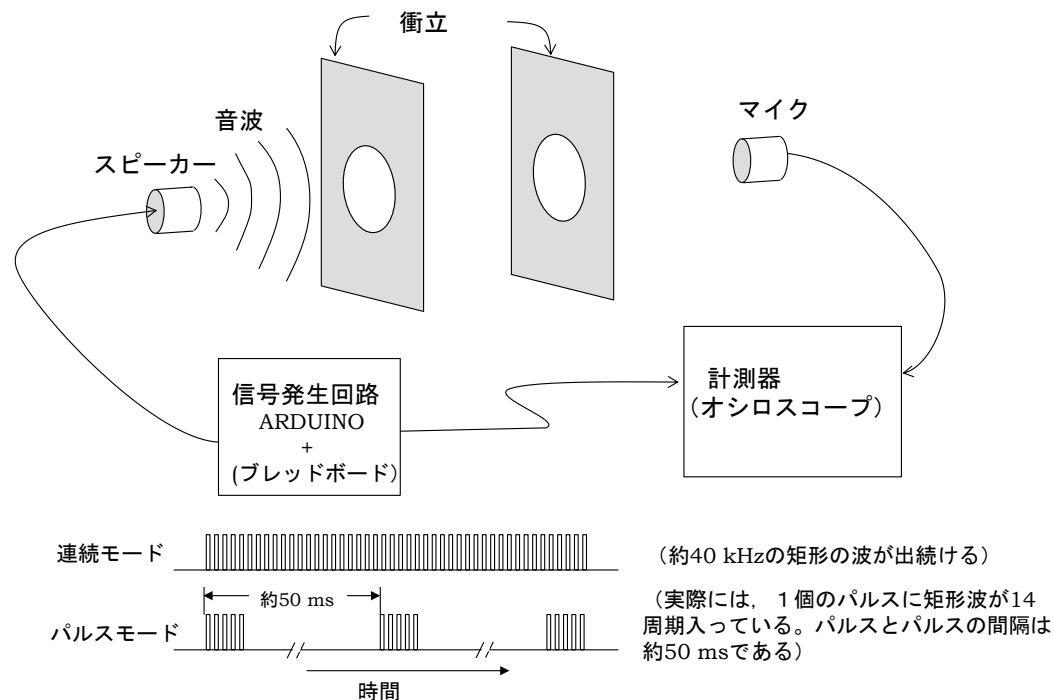


図 2-1 実験セットの構成

図 2-1 に実験セットの構成を模式的に示す。信号発生回路からの電気信号をスピーカーに送って音波を発生し、その音波をマイクロフォン（マイク）で受けて電気信号として計測器

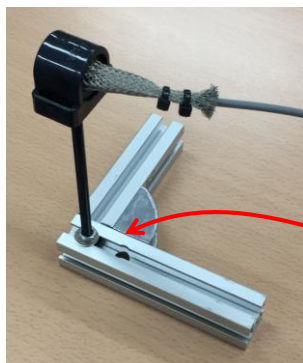
(オシロスコープ) に送り、画面に表示させて、音波の波形 (圧力の時間変化) などを観察する。マイクとスピーカーはほぼ同じ構造を持っており、電気信号を機械的な振動に変換したり、その逆の変換を行ったりできる。ただし、超音波の送受信を目的にしているので、特定の振動数にだけ効率よく応答するように設計されている。

実験の目的に応じて、スピーカーとマイクの上に穴あき金属板や膜などを貼り付けた衝立 (ついたて) を置いて、音の伝わり方の様子を調べることができる。スピーカーに送られる電気信号は、ARDUINO というワンボードコンピュータで作られる矩形波であり、連続モードとパルスモードという二つのパターンが用意されている。

## **【実験の準備】**

### **1. アルミフレームの組み立て**

実験装置は、アルミフレームとアクリル板で構成される。図 2-2 の組み立て説明図に従って、マイクスタンド 1 個、固定衝立 1 台、可動衝立 1 台を組み立てなさい。なお、2 本のスプリング (部品番号 15) は、課題 2-4 以降で使用するので、それまでは取り付けない。



8 マイク



9 マイクの足

マイクのスタンドに、5 mm六角穴ボルトで足を取りつける。

●ボルト、ナットが脱落している場合は予備を使用



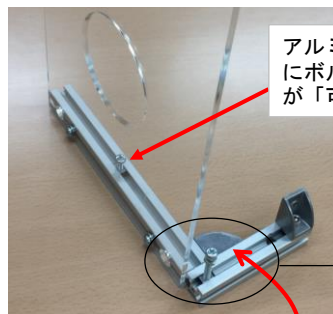
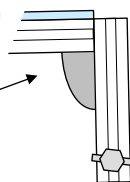
ナットは上図のようにあらかじめアルミフレームの溝にはめ込まれている（移動可能）。



ボルトは上図のようにあらかじめブラケットにはめ込まれている。

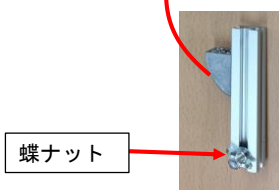
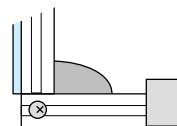


10 固定衝立



12 可動衝立

アルミフレームの中央付近にボルトが付いているものが「可動衝立」



蝶ナット

11 固定衝立の足



上側に金具

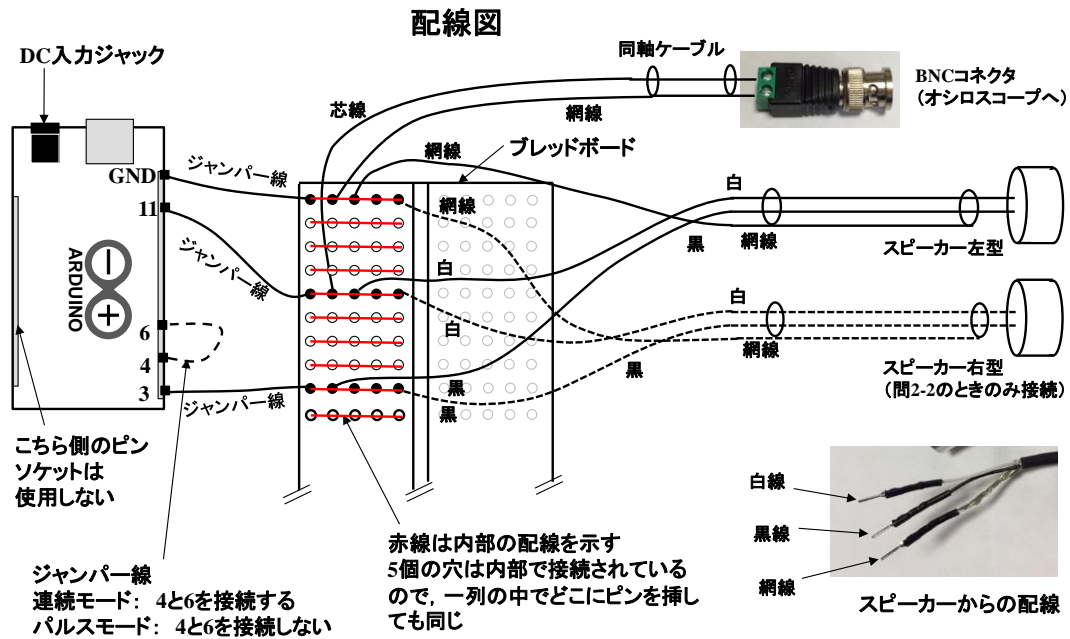
13 可動衝立の足

同様の手順で、固定衝立、可動衝立のそれぞれに、5 mm六角穴ボルトで足を取りつける。

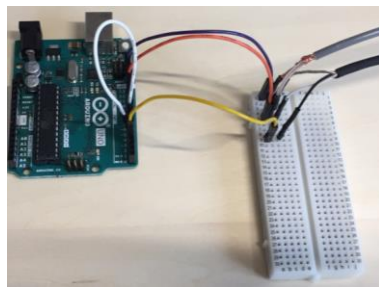
図 2-2 フレームの組み立て説明図

## 2. 回路の接続

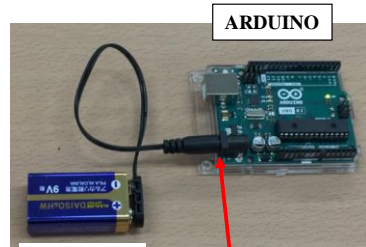
ARDUINO (ワンボードコンピュータ) の 11 番ピンには矩形波, 3 番ピンには逆位相の矩形波が出力される。4 番, 6 番ピンはモードの切り替え用, GND は接地である。それ以外のピンは使わない。配線を分岐させるために, ARDUINO の出力をブレッドボードで中継して, スピーカー等のケーブルに接続する。ブレッドボードの裏側には両面接着テープが付いているが, これを剥がすと中身の接点が脱落するおそれがあるので, 裏紙をはがさない。図 2-3 の配線図に従って, ARDUINO とブレッドボードをジャンパー線で接続する (ジャンパー線の色は気にしなくてよい)。次に, ブレッドボードに BNC コネクタ付き同軸ケーブルのピンを接続する (このとき, 網線と芯線を間違えないように注意する)。更に, スピーカー (左型のみ) を接続する (網線, 白線, 黒線の区別に注意; 写真を参照)。ジャンパー線で 4 番ピンと 6 番ピンを接続する。配線が間違っていないことを確認した後, 最後に電源 (6P 型乾電池 9 V) を接続する。**(配線を間違えたまま通電すると ARDUINO を壊してしまう可能性があるので十分に注意する事。)** この時点で回路は動作を開始し, スピーカーは超音波を発しているはずである (ヒトの耳には聞こえない)。



ピンは、最後までしっかりソケットに差し込む



ARDUINO, ブレッドボード, BNC同軸ケーブル, スピーカ(1個)の配線(ジャンパー線の色は気になくてよい)



配線を確認した後にDC入力ジャックにしっかり差し込む

赤線で示したように、内部で5個の穴が電氣的につながっている。配線にはどの列を使っても良い。

内部構造: 5個のソケットが1枚の金属板で作られている。

ピンの先端を垂直にしっかり差し込む。ただし、無理をするとピンが折れてしまうので注意。

#### ブレッドボードの使い方

図 2-3 ARDUINO への配線図とブレッドボードの使い方

### 3. オシロスコープの接続

オシロスコープの基本的な使用法は、別冊「オシロスコープの使い方」(以下「使い方」と略記)にまとめてある。またオシロスコープに付属している「日本語簡易マニュアル」にももう少し詳しく記載されているので、適宜参照すること。なお、オシロスコープの操作に関して疑問がある場合は番号札を通路側に出して、積極的に監督者に聞きなさい。

まず、以下の手順でオシロスコープを実験装置と接続しなさい。

- (1) 動作を確実にするために、「(使い方) 1. オシロスコープの初期状態へのリセット(初期化)」にしたがって、オシロスコープの初期化を行いなさい。
- (2) 続いて、「(使い方) 3. 入力の表示・非表示切り替えと入力方法設定」に従って CH1, CH2 ともに Coupling は DC, Probe の Attenu は×1 に設定しなさい。
- (3) 回路からの矩形波信号 (BNC コネクタ付き同軸ケーブル) を CH1 (チャンネル 1, トリガーに使用) に、マイクの出力ケーブルの BNC コネクタを CH2 (チャンネル 2) に接続する (図 2-4(a)を参照)。
- (4) オシロスコープの Autoset ボタン (パネル右上にある) を押し、自動的に感度や掃引速度が調整されるのを確かめなさい。

ARDUINO の 4 番ピンと 6 番ピンが接続されていれば、連続モードになり、図 2-5(a)のような矩形波

(赤) が表示されるはずである。この矩形波が画面上に、見やすい周期と十分な振幅で表示されるように、

掃引速度 SEC/DIV (秒/目盛) と

CH1 (赤) の感度 VOLTS/DIV (電圧/目盛) を調整しなさい。必要ならば、VERTICAL (垂直)

POSITION, HORIZONTAL (水平) POSITION も調整しなさい。

(参照: 「(使い方) 4. 縦・横表示のスケール・ポジション設定 (手動変更と Autoset による自動調整) )

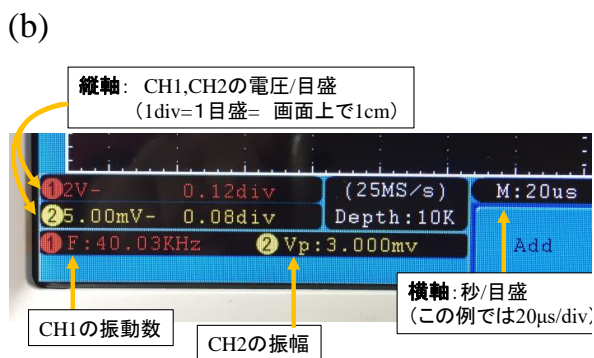


図 2-4 (a)オシロスコープ入力端子への配線

(左: CH1, 右: CH2)

(b)オシロスコープの画面表示

#### <トリガーに使うチャンネルの確認>

- (5) TRIGGER の Menu (パネル右端) を押し、画面下 2 番目の Source という項目に、CH1, CH2 のいずれかが表示されている。CH2 になっている場合は、Source(H2)→CH1(F1)と変更しなさい。

この矩形波が画面上で流れている場合は、波が静止するように TRIG LEVEL を調整しなさい (TRIG LEVEL は、画面右端に紫色の三角印 ( ◀ ) で表示されている)。(参照:「(使い方) 5. トリガーの設定」)

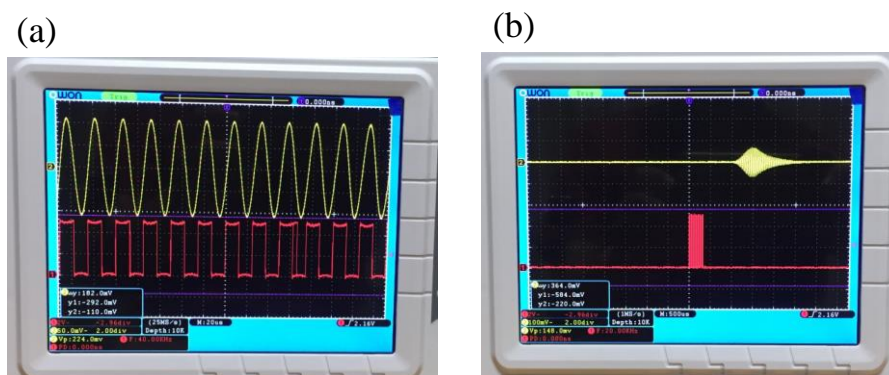


図 2-5 (a)連続モードと(b)パルスモード。画面上で横軸が時間に対応し、右方向が正の向きである。

#### <振動数や振幅を表示する方法>

(6)「(使い方) 6. 入力信号の測定値を表示する方法 (Measure 機能の使い方)」に従い以下測定値を表示させなさい。

CH1 の振動数  $F$  を表示

Measure→Add(H1)→Type(F1)→Freq (ダイヤル M で選ぶ),  
Source(F2)→CH1 (F2 を押すと CH1⇔CH2 と切り替わる), Add(F4)

CH2 の振幅  $V_p$  を表示

(※「振幅  $V_p$ 」は画面に表示されている波形の最大値と最小値の差であり、  
以下これも振幅とよぶ)

Measure→Add(H1)→Type(F1)→PK-PK (ダイヤル M で選ぶ),  
Source(F2)→CH2, Add(F4)

(正しく設定すれば、図 2-4(b)のように画面左下の窓に数値が表示される)

矩形波が左右に流れることなく正しく表示できたか、画面表示に、 $F$  と  $V_p$  が表示できたか確認しなさい。(連続モードの状態ですら正しく動作していれば  $F$  として 40 kHz に近い値が表示される)

#### (準備課題)

#### 問 2-0

矩形波の振動数  $F$  の値 (実測値) を求めなさい。

#### 4. スピーカーとマイクのテスト

次に、**連続モード**のまま、スピーカーとマイクを向かい合わせに置き、CH2（黄色）に表示される波形を確認しなさい。装置が正常に動作していれば、図 2-5(a)のような正弦波（黄色）が表示されるはずである。見やすい振幅で表示されるように CH2 の VOLTS/DIV と VERTICAL POSITION を調整する。

スピーカーからマイクまでの距離を変化させると、正弦波の振幅が変化し、波の位置が左右に移動することを確認しなさい。

次に、ARDUINO の 4 番ピンと 6 番ピンをつないでいるジャンパー線を取り外す。今度は、矩形波が 14 周期繰り返したのち 0 V を出力するという動作を約 50 ms を周期として繰り返す。これを**パルスモード**と言う。このとき、マイクの出力も間欠的になる（図 2-5(b)黄色）ことを確かめなさい。マイク出力の波形が画面から外れている場合は、SEC/DIV や HORIZONTAL POSITION を使って調整する。この状態で、スピーカーとマイクの距離を大きく変化させると、音波の到達時刻（CH2 の波形の位置）が変化することが、オシロスコープの画面上で確認できる。

パーティションや段ボール板などに向けて音波を発射し、マイクで受けると、エコー（こだま）が返ってくることを確認しなさい。

ここまですべてできなかつた場合は、電池、配線、装置自体に問題がある可能性がある。自分で解決できない場合は番号札を通路側に出して監督者に知らせなさい。実験開始後でも、装置の不具合が疑われる場合は、遠慮せず知らせること。

なお、この課題では、他の人のスピーカーから出ている超音波が受信され、波形として重なってくることがあるので、注意が必要である。気になるときは、段ボール板を立てるなどすればある程度軽減できる。他人になるべく迷惑を掛けないという観点から、スピーカーをなるべく外側に向けないようにする、また必要なとき以外は電源を切っておく（乾電池を DC 入力ジャックから外す）などの配慮をしてほしい。

#### <波形についての補足説明>

スピーカー（11 番ピン）へ入力される電気信号は、図 2-5(a)の赤線のような矩形波であるが、スピーカーの中にある振動板自身が約 40 kHz の固有振動数をもっている（音叉のような特性）ので、発せられる音波の波形はほぼ正弦波になる。マイクの方も同様の特性を持っているので、結果として、マイクから出力される電気信号は非常に正弦波（黄色）に近いものになる。振動板の振幅の増大と減衰に時間がかかるので、(b)のパルスモードでは、マイクから出力される電気信号は立ち上がりがなだらかで、かつ尾を引く形（黄色）になっている。



## 【解説】音の伝わり方と干渉

### 1. 平面波と球面波

大きな面積の膜があり、これが振動して音を出している状況を考えよう。膜に接する空気が圧縮・膨張を繰り返す、圧力の振動となって空気中を波として伝わっていく。振動の振動数を  $f$  とすると、時刻  $t$  における圧力の変化  $p$  (大気圧からの差) は

$$p(t) = A \sin[2\pi f t + \delta] \quad (2-1)$$

と表される。ここで、 $A$  は圧力変化の振幅、 $\delta$  (デルタ) は時間原点の取りかたによって決まる定数で、初期位相と呼ばれる。この圧力変化は音速  $v$  で空気中を伝わっていく。波長を  $\lambda$  とすれば、

$$v = f \lambda \quad (2-2)$$

と表される。図 2-6 では黒いところが、圧力が高いところであり、これが右方向へ移動していく。膜から距離  $x$  のところでは、 $x/v$  の時間遅れがあるから、そこでの圧力変化は

$$p(t, x) = A \sin\left[2\pi f \left(t - \frac{x}{v}\right) + \delta\right] \quad (2-3)$$

と表される。図 2-6 中のグラフは、ある瞬間の圧力変化  $p$  を位置  $x$  の関数として図示したものである。 $t$  がわずかに増加したとき、 $t - x/v = \text{一定}$  となるように、 $x$  を増加させれば、位相 (式 (2-3) の [ ] で囲まれた部分) が不変に保たれることから、波は時間とともに  $x$  軸方向の正の向きに (図では右へ) 移動して行くことがわかる。ある時刻において、同じ位相の点を連ねた面 (この図では直線) を波面と言う。この場合は波面が平面なので、「平面波」と言う。

次に、花火の爆発のように空間の一点で圧力の変化が起こりその波が伝わっていく場合を考えよう。この場合は、図 2-7 に示すように、波面は球形となり、波は全方位に均等に広がっていく。これを球面波と言う。

### 2. 干渉

音波は圧力の波なので、二つの波が空間的に重なると、強め合ったり弱めあったりする。この現象を干渉という。図 2-8 に示すのは、

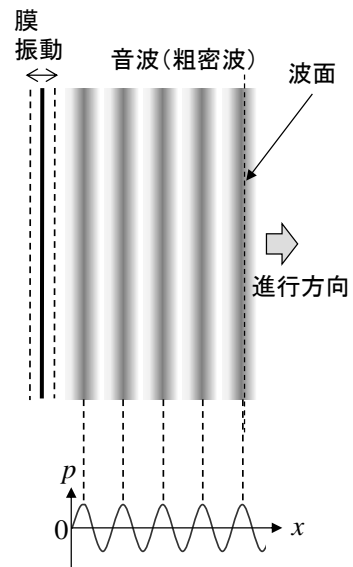


図 2-6 音波の発生(平面波の場合)

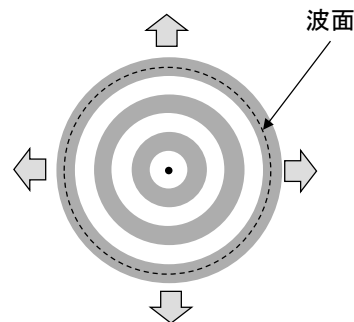


図 2-7 音波の発生(球面波の場合)

音波 A :

$$p_a = p_0 \sin \left[ 2 \pi f \left( t - \frac{x}{v} \right) \right] \quad (2-4)$$

と、振動数と振幅は同じで位相が  $\pi$  だけ異なる音波 B:

$$p_b = p_0 \sin \left[ 2 \pi f \left( t - \frac{x}{v} \right) + \pi \right] \quad (2-5)$$

であり、いずれも右方向へ進んでいる。これらを重ね合わせると、

$$p_a + p_b = 0 \quad (2-6)$$

となり、圧力の変化が全くなくなってしまう、つまり音が消えてしまうのである。

干渉からいろいろな興味深い現象が出てくる。光の場合には、干渉を利用して波長の異なる光を分けたり（分光器）、距離を正確に測ることができる。また、ガラス表面での反射を防止するコーティングや、立体画像を映し出すホログラムなども干渉効果の利用例である。音波についても類似の現象をみることができる。

### 3. 回折

光や音波が小さな穴が開いた障害物に当たると、穴から漏れた波は、そこから球面波のように広がって影の部分にも回り込んでいく。この現象を回折という。

図 2-9 のように 2 個の穴があると、そこから出た回折波が重なりあって干渉を起こす。 $D \sin \theta = n \lambda$  ( $D$  は穴と穴の間隔,  $n$  は整数) を満たす場合、十分遠方において、両者の波の山と山が重なるので、強め合う。単色光と 2 本のスリットを用いた干渉実験は「ヤングの実験」と呼ばれ、光が波としての性質を持つことの実証実験として有名である。

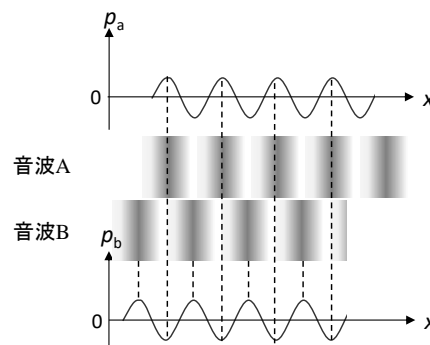


図 2-8 音波の干渉。音波 A と B で位相が  $\pi$  ( $180^\circ$ ) ずれている。

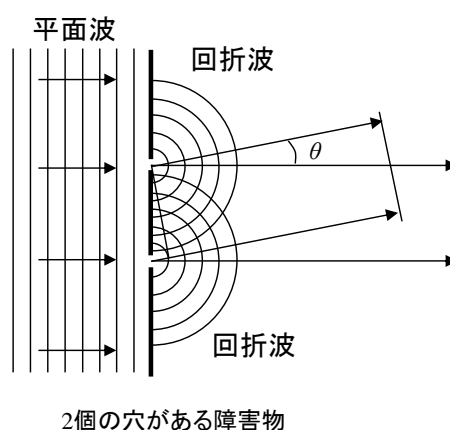


図 2-9 回折波の干渉

### 課題 2-1 音の速度とエネルギー

図 2-10 のように、スピーカーとマイクを向かい合わせて置くことにより、空気中の音波の伝播を見ることができる。二つの方法で音速を決定してみよう。また、音波の減衰を調べてみよう。

**注意:** スピーカーやマイクの足の座りが良くない場合は、足の取り付けネジ (2 個) を少

し緩めて、机に押し付けた状態で締め直すと改善することがある。

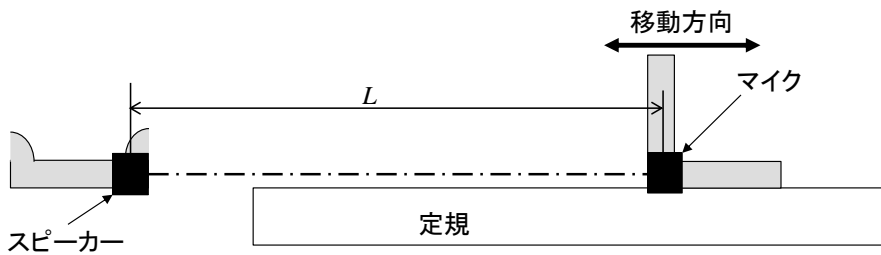


図 2-10 課題 2-1 の実験配置図 (上から見た模式図)

### 問 2-1a

パルスモードにしておいて、スピーカーとマイクの距離  $L$  を変化させると、到達時間に応じて音波パルスの現れる位置が動いていくのがわかる。オシロスコープの画面から読み取った時間遅れと距離  $L$  との関係から、できるだけ正確に音速を算出しなさい。測定の手順も記述すること。

**注意：** 測定中に定規やスピーカーが動いてしまう恐れがあるので、両面テープで机に固定しておくといよい。1 目盛の時間幅は、M: の欄に単位と共に表示されている (図 2-4(b) 参照)。

### 問 2-1b

連続モードにして音波の波形を見ると、距離の変化に伴って、オシロスコープの画面上で波が移動して行くことがわかる。移動した波の周期数と距離  $L$  の関係から、波長を求めることができる。できるだけ正確に波長を測り、波長の値から音速を算出しなさい。測定の手順も記述すること。

### 問 2-1c

この実験は連続モードで行う。振幅  $A$  は距離  $L$  に対してどのような関数になっているか、オシロスコープの画面左下に表示されている  $V_p$  の値を使って調べなさい。なお、ここで用いるスピーカーの振動板はある程度の大きさを持っているが、十分に遠くから見れば、音波は 1 点から出た球面波 (の一部) とみなすことができる。スピーカーおよびマイクの振動板は、本体の中心付近にある。

**ヒント：** 数個の異なる距離での測定結果を、適切な変数を両軸にとってグラフにプロットしたとき、直線に乗れば距離依存性 (振幅と距離のあいだの関係) の特徴が分かる。

### 問 2-1d

音波の振幅と音波の強度 (音波が単位時間内に運ぶ、進行方向に垂直な単位面積当たりのエネルギー) は、どのような関係にあると考えられるか、この測定結果を踏まえて述べなさい。

**ヒント：** 球面波の場合についてエネルギーの保存を考えよ。

## 課題 2-2 2音源による干渉実験

図 2-9 では二つの穴からの波を干渉させているが、ここでは、穴あるいはスリットの代わりに二つのスピーカーを使って再現を試みる。いったん乾電池のコネクタを抜いてから、スピーカー（右型）を、図 2-3 の配線図に破線で示すように、ブレッドボードの空いている端子に接続し（網線、白線、黒線をスピーカー（左型）と同じになるように）、再び電池を接続する。本実験では、**連続モード**を使用する。

### 問 2-2a

図 2-11 のように、二つのスピーカーを  $D$  ( $=5\text{ cm}$  程度) の間隔で平行に並べて置き、十分遠方に、二つのスピーカーの midpoint とマイクを結ぶ直線（一点鎖線）に垂直に定規を貼り付ける。定規に沿ってマイクを動かし、振幅を位置の関数として測定して、干渉縞ができていくこと、すなわち、振幅が周期的に変化していることを確認し、グラフにきなさい。このグラフから干渉縞の間隔  $s$  を求めなさい。測定手順も記述すること。

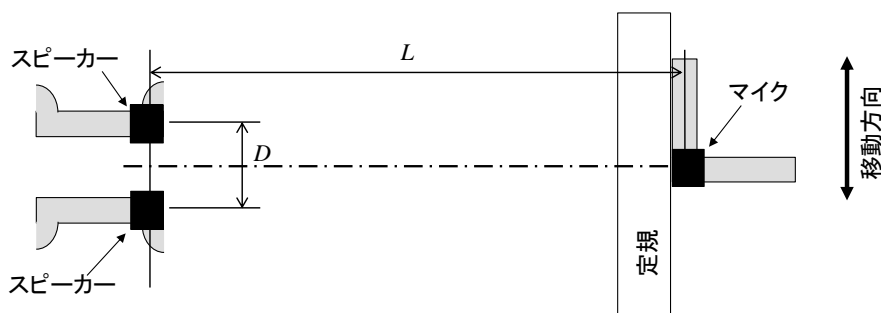


図 2-11 2音源による干渉実験

### 問 2-2b

$D$  と  $L$  と  $s$  から波長  $\lambda$  を求めなさい。また、ここで求めた波長の値が課題 2-1 で求めた波長とどの程度一致するか。一致しない場合は誤差の原因を推定しなさい。

## 課題 2-3 2枚の膜または穴あき板による干渉

薄膜（または波長より小さい穴を多数あけた板）に波を当てると一部は反射し、一部は透過する。反射率の高い 2 枚の薄膜を平行に置くと、その間で波が往復することにより、興味深い現象が起こる。その代表的な装置がファブリー・ペロー干渉計と呼ばれる光学装置である。本実験では、干渉計の特性を、音波を使って再現してみる。まず、その原理を解説する。

### 【解説】干渉計の原理

ファブリー・ペロー干渉計は、波の往復によって干渉の効果を高め、非常に分解能の高い分光を行う時に利用される。図 2-12 に示すように、2 枚の半透明鏡①②（音波の場合には薄膜や穴あき板など）を置いて、左側から波を入射させる。膜を透過する波、反射す

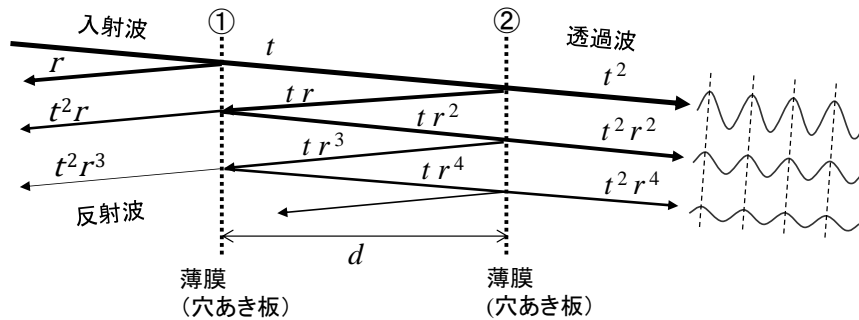


図 2-12 ファブリー・ペロー干渉計の原理 (実際には波は①の面に垂直に入射するが、分かりやすくするために、入射波の方向を少し傾けて図示してある)。

る波の強度の入射する波の強度に対する比をそれぞれ透過率, 反射率という。また、これを振幅 (絶対値) の比で表したものを、振幅透過率  $t$ , 振幅反射率  $r$  と定義する。

入射波 (振幅 1) の一部は最初に①で反射され (振幅  $r$ )、残りが透過する (振幅  $t$ )。さらに②を透過して、右側に抜けていく波は振幅  $t^2$  を持つ。一部は②で反射され (振幅  $tr$ )、さらに①で透過波と反射波に分けられて、後者は右方向へ向かい、一部は②を抜けていく。その透過波は  $t^2r^2$  の振幅を持っている。以下同様に、何回も反射して抜けてくる波すべてを合成したものが右側で観測される波となる。

透過波すべての和を計算することで、最終的に観測される波の振幅を計算することができる。反射の回数が増えるにしたがって、振幅は小さくなり、同時に位相もずれてくるので、その和を計算する事は簡単ではないが、①と②の間隔  $d$  がちょうど半波長の整数倍 (式(2-10)で  $\delta_0 = 0$  と仮定) になっている場合に限っては、図 2-12 の右端に示したようにすべての透過波の位相が完全に揃って強め合うので、合成した波の振幅は各透過波の振幅の単なる和になる。したがって、入射波の振幅を 1 とすると、合成した波の振幅  $A$  は、

$$A = t^2 + t^2r^2 + t^2r^4 + \dots = \frac{t^2}{1 - r^2} = 1 \quad (2-8)$$

と求められる (ここで  $t^2 = 1 - r^2$  を用いた)。つまり、入射した波がそのままの振幅で透過してくるのである。

①と②の間隔が中途半端な場合は、1 往復分の位相差  $\varphi$  を考慮して計算しなければならない。結果は、

$$A(\varphi) = \left[ \frac{(1 - r^2)^2}{1 - 2r^2 \cos \varphi + r^4} \right]^{1/2} \quad (2-9)$$

$$\varphi = 4\pi \frac{d}{\lambda} + \delta_0 \quad (\text{垂直入射の場合}) \quad (2-10)$$

となる。 $\delta_0$  は、半透明鏡 (音波の場合は薄膜や穴あき板) の性質で決まる定数であり、2 回の反射にともなう位相遅れを表す。

いくつかの $r$ の値についての計算結果(振幅 $A$ )を図2-13に、そのときの $r$ と $t$ の値を表2-1に示す。式(2-9)を見てわかるとおり、 $A$ は $\varphi$ の周期関数であり、 $\varphi/2\pi$ が整数の時には $r$ の値に関わらず1に等しい。また、 $A$ は位相差 $\varphi$ (①と②の間隔で決まる)によって大きく変化し、その変化の大きさは、反射率が高い(透過率が低い)ほど大きい。ただし、この計算では半透明鏡による吸収や回折による損失は考慮していない。

干渉計は「分光器」として機能する。たとえば、ある波長 $\lambda$ に対して①と②の間隔 $d$ を式(2-10)に従って $\varphi/2\pi = 1$ になるようにセットする。ここで、 $\lambda$ を少し変化させると、 $\varphi/2\pi \neq 1$ になるので、透過率は急速に下がり、波は透過できなくなる。したがって、特定の波長の波だけを通す分光器として働くのである。

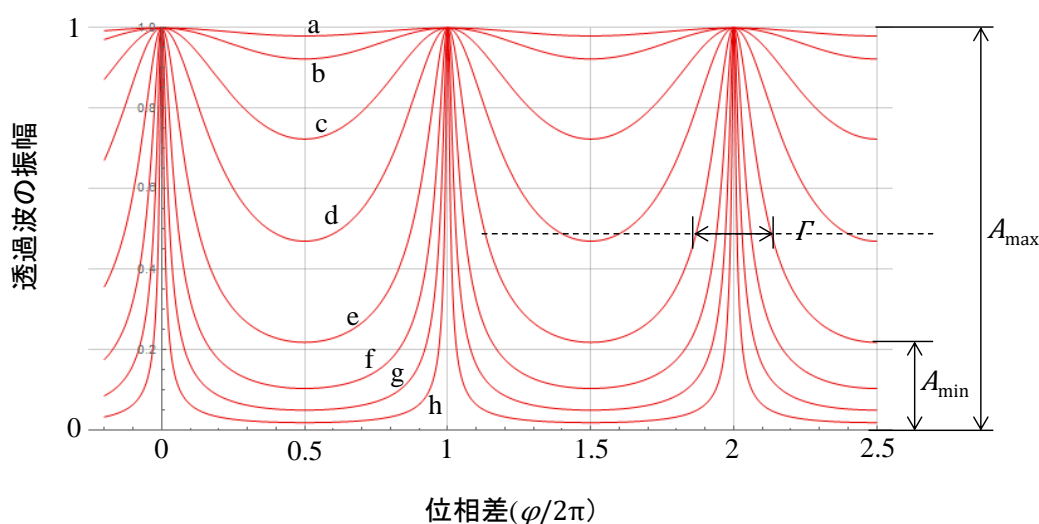


図 2-13 いろいろな $r$ の値に対する透過特性。 $A_{\max}$ 、 $A_{\min}$ 、 $\Gamma$ はそれぞれ曲線eの場合の透過波の振幅の最大値、最小値、およびピークの半値全幅(ピークの1/2の高さにおける幅)である。

波長のずれた波の透過をどれだけ阻止できるかについては、 $V = A_{\max}/A_{\min}$ から評価される。これをビジビリティーと言う。ビジビリティー $V$ は $A_{\max}^2/A_{\min}^2$ で表すのが一般的であるが、ここでは振幅比で示している。また、ピークの幅 $\Gamma$ が狭いほど、取り出す波の波長を正確に決められるので、「分光器」としての性能が高いと言える。

	振幅反射率 $r$	振幅透過率 $t$
a	0.1	0.995
b	0.2	0.98
c	0.4	0.92
d	0.6	0.80
e	0.8	0.60
f	0.9	0.44
g	0.95	0.31
h	0.98	0.20

**【課題 2-3 の実験準備 1】**

本課題では、スピーカー(1個)、マイク、

表 2-1 透過特性の計算に用いた $r$ と $t$ の値

固定衝立、可動衝立を使用する。衝立の窓に穴あき金属板やラップなどを貼り付ける場面が出てくるが、そのときは必要に応じてセロハンテープを使用すること。ラップはほぼ自然にアクリル板に密着する（しわにならないように注意）。

パルスモードと連続モードを切り替えることで、干渉効果の原理を観察することができる。以下、問 2-3a、問 2-3b まではパルスモードで実験を行う。

図 2-14 に示すように、まず、スピーカー 1 台とマイクを 50~60 cm ほど離して向かい合わせに置き、音波信号が最大になるように向きや位置を調整する。次に、衝立 2 枚の窓に穴あき金属板を貼り付け、それらをマイクとスピーカーの間に置く。（音波が窓の中心付近を通過できるように注意）。衝立間の距離は 30 cm 程度にするとよい。回折によって衝立を迂回したり、パーティションや机上の機器などに反射して、マイクに到達する波もあるかもしれないので、段ボールの遮蔽板などを使って確認し、必要ならば適切な場所にテープ止めなどで設置しておくか、機器の配置を変えてみる。

**ヒント：**時間遅れに着目すると、どこから反射波や回折波が来ているか見分けやすい。理想的な状態では、衝立の窓を段ボール片（適宜はさみで切り取ってよい）などで塞ぐと、音波信号は見えなくなるはずである。

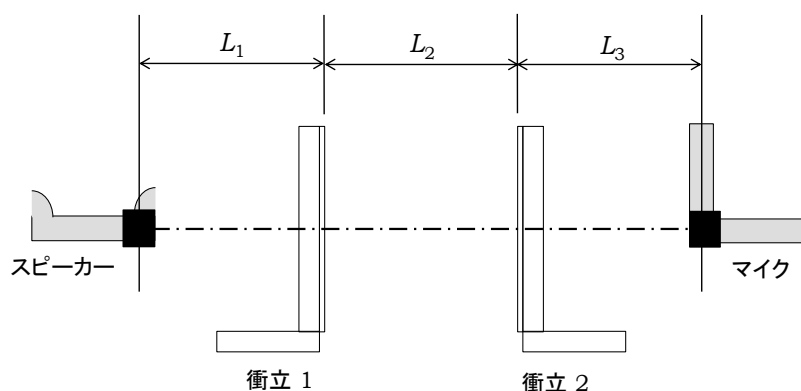


図 2-14 問 2-3a、問 2-3b の実験配置（上から見た模式図）。

### 問 2-3a エコーの観測（この実験はパルスモードで行う）

穴あき金属板を貼り付けた状態で、エコー（一定の時間間隔で現れる複数のパルス）が見えることを確認する（「山びこ」または「鳴き龍」効果）。衝立の平行度（仰角の調整など）などをうまく調整すると、沢山のエコーが現れるはずである。音波信号の時間間隔を求め、なぜその値になったかを説明しなさい。

エコーは何個目まで認識できたか。衝立の間隔を 1 cm 程度まで次第に狭くしていくと、エコーの間隔や振幅はどのように変化するか定性的に記述しなさい。間隔が狭いときに特徴的な振舞いは何か。また、その理由を「干渉」という言葉を使って説明しなさい。

### 問 2-3b 透過率の測定（この実験はパルスモードで行う）

スピーカー、衝立、マイクの間隔を適切に設定し、穴あき金属板が 1 枚のときと 2 枚のときの振幅透過率（入射波の振幅に対する透過波の振幅）を求めなさい。測定の方法と透過率の導き方についても記述すること。

ヒント:スピーカーから出た音波が衝立の間を往復してマイクに至ることもあるが、それは時間遅れがあるので、区別ができる。振幅の評価には、一度も反射せずにマイクに到達した波を使う事。

### 【課題 2-3 の実験準備 2】

図 2-15 のように、フレームのレール（部品番号 14）と可動衝立（12）を 2 本のスプリングで接続し、送りネジを回すと、可動衝立がレールに沿って滑らかに移動することを確認する。送りネジは、1 回転で 1 mm 前進するので、つまみの四角い板を目安にすれば、約 1/4 mm ずつ送る事ができる。ネジには「遊び」があるので、同じ回転位置に止めても押した場合と引いた場合で若干のズレが生じる。したがって、精密な測定の場合は、可動衝立の進行方向を決めておくとよい。固定衝立は、足の部分に縦向きの仰角調整ネジが取り付けられているので、これを回して、固定衝立が可動衝立と平行になるように調整する。そして、蝶ナットで固定する。実験の各場面で、平行性を注意深く調整するとよいだろう。固定衝立は必要に応じて目玉クリップでレールに固定する。穴あき金属板やラップを貼りつける作業などで邪魔になる場合は、スプリングを外して、レールから取り外してもよい。



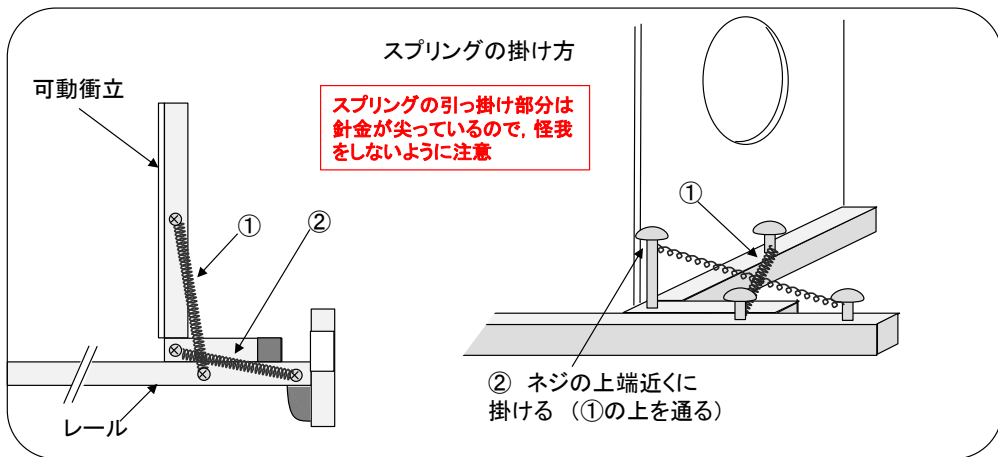
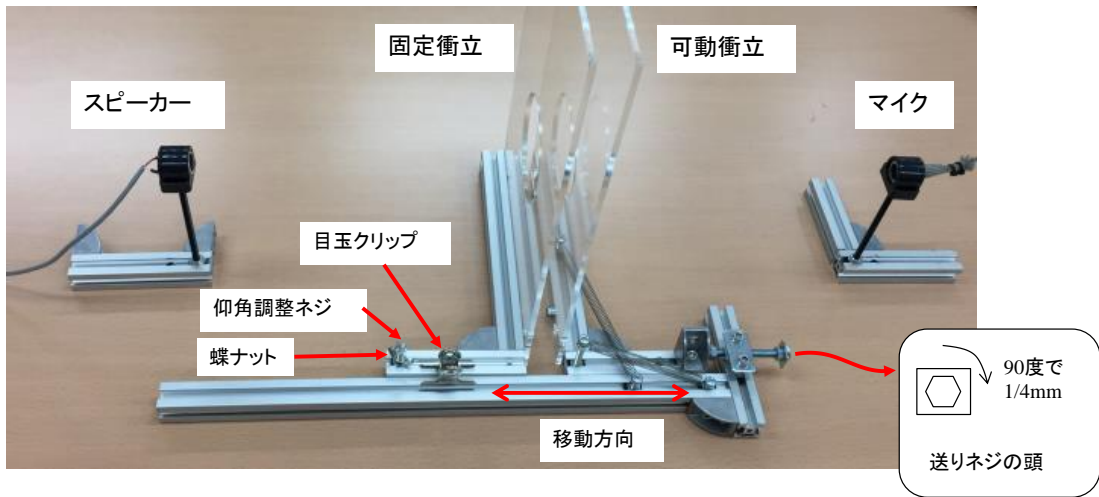


図 2-15 2枚の膜（穴あき金属板）による干渉

### 問 2-3c (以下の課題は連続モードで行う)

スピーカーとマイクを 50 cm ほど離して向かい合わせに置き、穴あき金属板を貼り付けた衝立がほぼその中間に来るようにレールを設置する。送りネジを回して可動衝立を少しずつ動かし、可動衝立と固定衝立との間隔の関数として透過波の振幅を測定する。

**ヒント:** 送りネジを一番押し込んだ時に衝立の間隔がゼロに近くなるような位置に固定衝立を置き、レールに固定すれば、ゼロ近くから約 2.5 cm までの範囲で間隔を変えることができる。

- (1) 送りネジを可動範囲全域で動かし、振幅が周期的に変化することを確かめなさい。数個の極大が見つかるはずなので、そのうちの適当な隣接する 2 個に着目し、それらのピークを含む範囲で、振幅を可動衝立の位置の関数として測定し、グラフにしなさい。
- (2) ピークの間隔を求めなさい。その値の波長に対する比はいくらか。また、そうなる理由を述べなさい。
- (3) 測定した値に適当な係数を掛けて、ピークの間隔とピークの高さが 1 になるように拡大・縮小し (この操作を規格化という)、解答用紙に複製してある図 2-13 の計算結果 (a~h) に重ね書きして比較し、 $r$  と  $t$  の値を推定しなさい。この際、ピークのひとつが原点に一致するように横軸の値に定数を加えてよい。また、問 2-3b で求めた振幅透過率と比較検討しなさい。

### 問 2-3d

二つのピークの間隔の中間点あたりで、振幅が極小となる。極大値と極小値の比 (ビジビリティー)  $V$  を求めなさい。

### 問 2-3e

二つの衝立に貼った穴あき金属板をラップに張り替えて、問 2-3c と同様の実験を行いなさい。図 2-13 の計算結果と比較し、ラップ 1 枚の  $r$  と  $t$  を推定しなさい。またビジビリティー  $V$  を求めなさい。

### 問 2-3f

二つの衝立の間隔を、透過波の振幅が最大になる位置にもどし、振幅(a)を記録しなさい。そののち固定衝立のみを注意深く取り除き、振幅(b)を記録しなさい。さらに可動衝立のラップを取り除いたときの振幅(c)を記録しなさい。(a) (b) (c)の大小関係はどうであったか。また、その理由も述べなさい。

## チャレンジ問題

余裕があったら以下のチャレンジ問題にチャレンジしなさい。ボーナス点（最大 12 点）を与える。ただし、満点（200 点）を越えないものとする。

### 課題 2-4 反射波の干渉（反射防止膜）

眼鏡のガラスなど透明体の表面で光は反射する。カメラなど何枚ものレンズを透過させる場合は、大きな損失になるし、ゴースト（本来の像の他に映る影のような像）の原因となり、きれいな像が撮影できない。しかし、干渉効果を利用するとこれを低減することができ、反射防止膜として利用されている。反射面を 2 枚作って、反射光が干渉によって打ち消されるように設計するのである。その原理を、音波を使って再現してみよう。

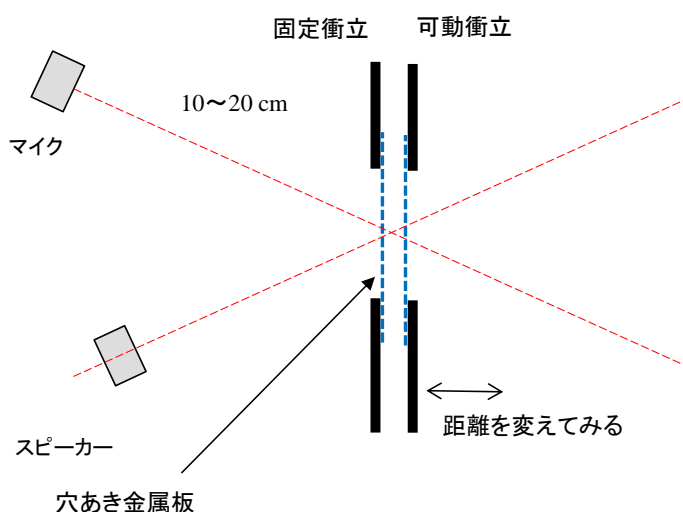


図 2-16 反射波の干渉（反射防止膜の原理）

#### 問 2-4a

まず、図 2-16 のように、スピーカーとマイクを衝立の窓に向けて斜めに配置し、反射波があればちょうどマイクで受けられるように、また、スピーカーからの音波が直接マイクに入らないように角度や距離を調整しておく。この配置で、①衝立に何も貼らない状態、②衝立の一つに穴あき金属板を貼った状態、③二つの衝立に穴あき金属板を貼った状態を比較する。可動衝立の位置を変えて実験すると、ある条件では反射が軽減されることを確かめなさい。反射が最も減少したときの条件と減少率を求めなさい。

**ヒント:** ①の状態でも窓の縁からの反射が入ってくることがあるので、これを極力減らしておくこと。

#### 問 2-4b

反射が減少したとき、そのエネルギーはどこへ行ったと考えられるか述べなさい。可能であれば、実験によってエネルギーの行き先を調べなさい。

