

物理チャレンジ 2023  
実験問題  
2023 年 8 月 19 日 (土)

試験時間	13:30 ~ 18:30
実験器具後片付け	18:30 ~ 18:50

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、オシロスコープの使い方、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、下敷き用のクリアフォルダ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. 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、番号札を使っ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。
8. 試験開始後から 16:50 までは途中終了（途中放棄）することはできない。
9. 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、番号札を使って監督者に知らせること。
10. 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。

© 公益社団法人 物理オリンピック日本委員会

## 目次

物理量の記法に関する注意事項	3
器具・部品一覧	3
課題 1 剛体の回転運動と角運動量の保存	8
発展問題	26
付録 A モーターの起電力と角速度の関係	27
付録 B RC 回路基板のはたらき	28
付録 C 剛体の回転運動に関する詳しい解説	29
課題 2 発光ダイオードと太陽電池	33
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  $\text{mA}$  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。オシロスコープで使用する物品は、本体以外にプローブ（赤）(p.5, 13(a)写真参考)と電源コードだけなので、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くこと。

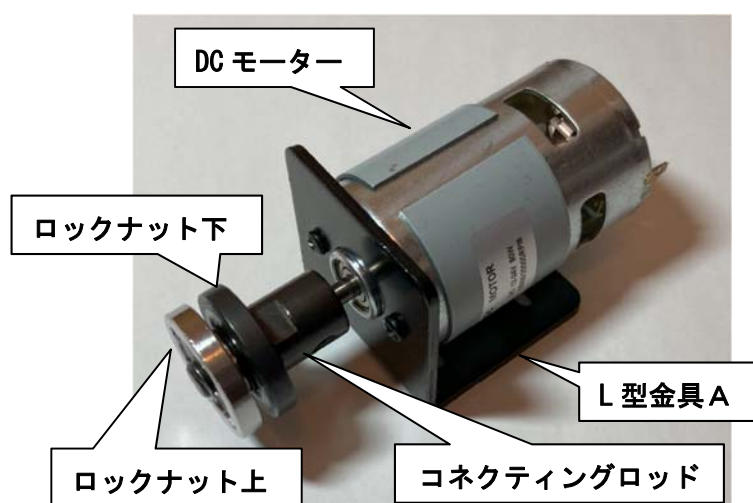
オシロスコープの付属品が不足または不明の場合は、番号札を使って監督者に知らせなさい。

### 課題 1,2 に共通する部品

番号	品名	内容	数量	包装	確認
1	計算機		1 台	箱の外	
2	定規（竹製）	30 cm	1 本		
3	方眼紙（下書き用）	A4	6 枚		
4	白紙（下書き用）	A4	4 枚		

### 課題 1 の器具・部品

番号	品名	内容	数量	包装	確認
1	DC モーター	コネクティングロッド, ロックナット上下計 2 個, L型金具A装着済み	1		
1(a)	ロックナット上	1 DC モーターに装着済	1		
1(b)	ロックナット下	1 DC モーターに装着済	1		
1(c)	コネクティングロッド	1 DC モーターに装着済	1		
1(d)	L型金具A	1 DC モーターに装着済	1		
2	アルミフレーム台	アルミフレームの台にL型金具B装着済	1		
2(a)	L型金具B	2アルミフレーム台に装着済	1		
3	回転台	アルミ板にばねとおもりを装着したもの	1		
4	RC 回路基板	みのむしクリップ付き	1	袋 A	
5	M4 ネジ	φ4 mm ネジ	2	袋 B	
6	M4 ワッシャ	φ4 mm 金属ワッシャ	2	袋 B	
7	M4 ナット	φ4 mm ナット	2	袋 B	
8	プラスチックワッシャ	コネクティングロッド用	1	袋 B	
9	割棒	タコ糸付き	1	袋 C	
10	CD	コンパクトディスク	5	袋 D	
11	摩擦シート	実験装置設置用	1		
12	ナットドライバ	M4 ナット用	1		
13	オシロスコープ	OWON 社, SDS5032E 型	1	専用箱	
13(a)	プローブ(赤)	13 オシロスコープと同梱	1	専用箱	



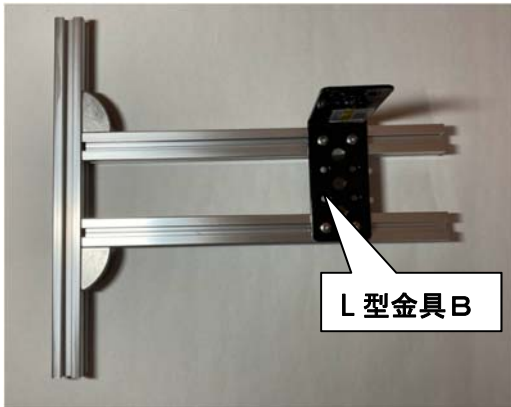
1 DC モーター



1(a) ロックナット上



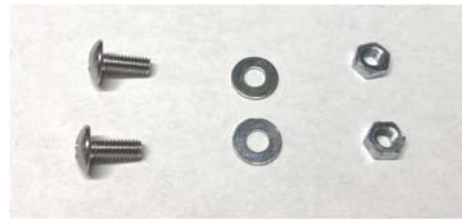
1(b) ロックナット下



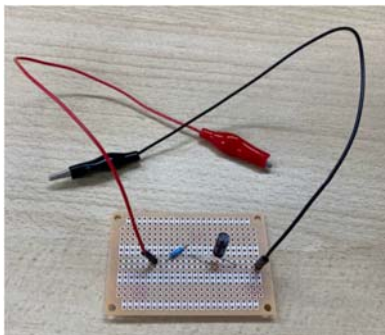
2 アルミフレーム台



3 回転台



5 ネジ 6 ワッシャ 7 ナット



4 RC回路基板



8 プラスチックワッシャ



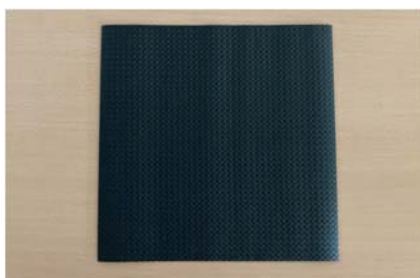
9 割棒



10 CD



13 オシロスコープ



11 摩擦シート



12 ナットドライバー



13(a) プローブ(赤)は赤マーク入り

課題 2 の器具・部品

番号	品名	内容	数量	包装	確認
1	発光ダイオード (LED) (赤色)		2 個	袋 E	
2	発光ダイオード (LED) (青色)		2 個	袋 E	
3	太陽電池		1 個	袋 E	
4	抵抗	100 $\Omega$	1 個	袋 E	
5	可変抵抗	1 k $\Omega$	1 個	袋 F	
6	ジャンパー線		10 本	袋 F	
7	ブレッドボード		1 個	袋 F	
8	電池ボックス (22 $\Omega$ の抵抗付き)	単三 4 個用	1 個	袋 F	
9	マルチメータ (測定プローブ 2 本付き)		2 台		
10	乾電池	単三 1.5 V	4 個	袋 F	
11	輪ゴム		1 個	袋 F	

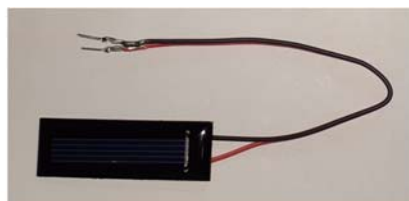
課題2で使用する器具・部品の写真



1 発光ダイオード  
(LED)(赤色)



2 発光ダイオード  
(LED)(青色)



3 太陽電池



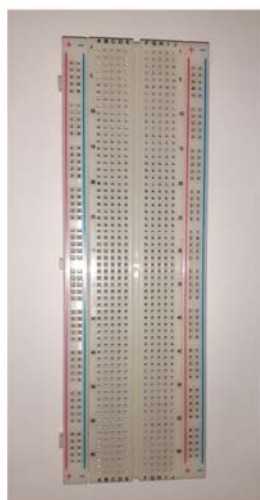
4 抵抗(100 Ω)



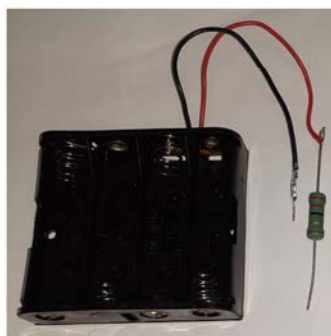
5 可変抵抗  
(1 kΩ)



6 ジャンパー線



7 ブレッドボード



8 電池ボックス  
(22 Ω の抵抗付き)



9 マルチメータ  
(測定プローブ2本付き)

## 実験課題 1 : 剛体の回転運動と角運動量の保存

### 【課題の目的】

並進運動における運動量保存の法則に対応するものとして、回転運動には角運動量保存の法則がある。惑星の運動における面積速度一定の法則（ケプラーの第2法則）や、フィギュアスケートで手を広げてスピニングしているスケーターが腕を縮めると回転が速くなるのはその例である。

本課題では物体の固定軸の周りの回転運動について調べる。物体の並進運動において、質量は物体の動かしにくさや、止めにくさ（慣性）を表わす量であるが、物体の回転運動についても、回転させにくさや、止めにくさを表わす量があり、これを慣性モーメントと呼んでいる。モーターが回転すると起電力が発生することを利用してこの慣性モーメントを求めてみよう。また、角運動量が保存されることを実験的に確かめてみよう。

### 【課題の背景】

#### 物体の回転運動について

この課題では、物体の回転運動を取り扱うので、その運動を記述する方法を紹介する。質量  $m$  の物体の直線運動（図(a)）はニュートンの運動方程式

$$ma = m \frac{dv}{dt} = F \quad (1)$$

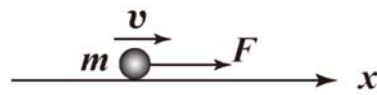
で記述される。ここで、 $F$  はその物体に働く力、 $v$  は速度、 $a$  は加速度である。式(1)では、物体はその姿勢（向き）を変えずに移動（並進運動という）するものとされる。この場合、物体には大きさがなく、質量だけを持つもの、と見なしたことになる。これを**質点**という。

質点が図(b)のように平面上の一点  $O$  に軽い（質量が無視できる）棒（変形（伸縮・屈曲）しない）でつながれていて半径  $r$  の円周上でしか動けないとすると、円運動をすることになるが、その速度について同じ方程式(1)が成り立つ。この場合、 $F$  は質点を受ける合力の接線方向の成分  $F_t$  を表し、速度  $v$  は接線方向を向き（反時計回りを正の向きとする）、**角速度**  $\omega$  を使って  $v = r\omega$  と表されるので、式 (1) は、

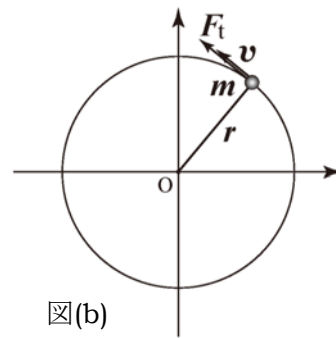
$$m r \frac{d\omega}{dt} = F_t \quad (2)$$

となる。接線方向の運動方程式によってきまる質点の速さ  $v = r\omega$  に応じて、質点の受ける合力の半径方向の成分（向心力）の大きさ  $F_C$  が次式のように定まる。

$$F_C = m \frac{v^2}{r} = mr\omega^2$$



図(a)



図(b)



式(2)の両辺に  $r$  を掛けると

$$m r^2 \frac{d\omega}{dt} = F_t r \quad (3)$$

を得る。右辺  $\tau = F_t r$  は**力のモーメント**（軸のまわりに回そうとする働き）であり、以下では**トルク**（torque）という（ $\tau$ はギリシャ文字で「タウ」と読む。アルファベットの“t”に対応する）。ここで**角加速度**

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt}$$

および**慣性モーメント**

$$I = m r^2 \quad (4)$$

という量を定義して、この式を書き直すと、

$$I \alpha = I \frac{d\omega}{dt} = \tau \quad (5)$$

という回転運動に対する運動方程式が得られる。これは式(1)と似た形をしており、 $I$  が質量  $m$ 、 $\tau$  が力  $F$ 、 $\omega$  が速度  $v$ 、 $\alpha$  は加速度  $a$  の役割をしていることが分かる。

大きさのある実在の物体は、多数の質点の集合体と考えられる。石のように固い物体は、相互の間隔が固定された多数の質点の集合体でモデル化できる。これを**剛体**という。固定された回転軸の回りに回転運動する剛体中のすべての質点は、共通の角速度  $\omega$  および角加速度  $\alpha$  を持つので、回転軸から距離  $r_i$  にある質量  $m_i$  の質点  $i$  の回転運動の方程式は、

$$I_i \alpha = I_i \frac{d\omega}{dt} = \tau_i \quad (5')$$

となる。ここで、 $I_i = m_i r_i^2$  および  $\tau_i$  は質点  $i$  の慣性モーメントおよび受けるトルクである。式(5')をすべて（ $N$  個とする）の質点について辺々加えると、

$$\left( \sum_{i=1}^N I_i \right) \alpha = \left( \sum_{i=1}^N I_i \right) \frac{d\omega}{dt} = \sum_{i=1}^N \tau_i$$

が得られる。右辺は剛体の各部分が受けるトルクの総和

$$\tau = \sum_{i=1}^N \tau_i$$

である。左辺の係数は、剛体の各部分の慣性モーメント  $I_i = m_i r_i^2$  の総和

$$I = \sum_{i=1}^N I_i = \sum_{i=1}^N m_i r_i^2$$

であり、剛体の慣性モーメントと呼ばれる。これらを用いると、剛体の回転運動は同じ方程式(5)で表されることになる。

## 剛体の慣性モーメント

剛体を  $N$  個の質点の集合体と考えたときの慣性モーメントは

$$I = \sum_{i=1}^N m r_i^2 \quad (8)$$

で表わされる。 $m_i$ は質点  $i$  の質量、 $r_i$ は回転軸までの距離である。式(8)の  $I$  は質量が集中した原子・分子でできている物体を、質量が空間内に連続的に分布していると見なすこと（これを連続体近似という）によって、剛体の占める空間について積分することにより計算できる。

質量  $m$ 、半径  $r_0$  の密度、厚さが一様な円板の中心を通り、円板に垂直な軸のまわりの慣性モーメントはその厚さに関わらず、

$$I = \frac{1}{2} m r_0^2$$

となることが知られている（詳しい求め方は付録C (p.29)にある）。

質量  $m$ 、外半径  $a$ 、内半径  $b$  の密度、厚さが一様なCDの中心を通り、CD面に対して垂直な軸のまわりの慣性モーメントは

$$I_{CD} = \frac{1}{2} m (a^2 + b^2) \quad (9)$$

となる。このことは次のようにして理解できる。

穴のないCDおよびCDの穴の部分の質量は、それぞれ  $m_a = \frac{a^2 m}{a^2 - b^2}$ 、および  $m_b = \frac{b^2 m}{a^2 - b^2}$

であるから、CDの慣性モーメントは、

$$I = \frac{1}{2} m_a a^2 - \frac{1}{2} m_b b^2 = \frac{1}{2} \frac{a^4 m}{a^2 - b^2} - \frac{1}{2} \frac{b^4 m}{a^2 - b^2} = \frac{1}{2} m \frac{a^4 - b^4}{a^2 - b^2} = \frac{1}{2} m (a^2 + b^2)$$

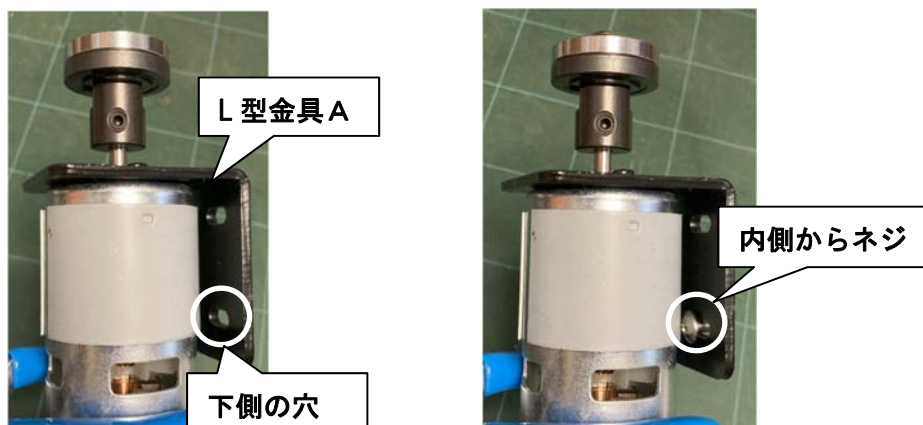
となる。

## 【課題 1 の準備】

### 1. 実験装置の組み立て

DC モーターが固定されている L 型金具 A とアルミフレーム台に固定されている L 型金具 B を 2 組のネジ、ワッシャ、ナットで結合する。

- (1) モーターに固定されている L 型金具 A の下の穴 2 つにモーター側（内側）からネジを挿入する。



- (2) L 型金具 A の外側に L 型金具 B を当て、その最上部 2 個の穴に内側からネジを通す。  
ワッシャを付けてナットを締める。強く締めるにはナットドライバーを用いる。金具の穴に遊びがあるので、アルミフレーム台を水平に保ったとき、モーターの軸が鉛直になるように注意して固定すること。



L 型金具 A の外側に L 型金具 B を当て、ネジをモーター側（内側）から穴に通す。

ネジにワッシャを通す。

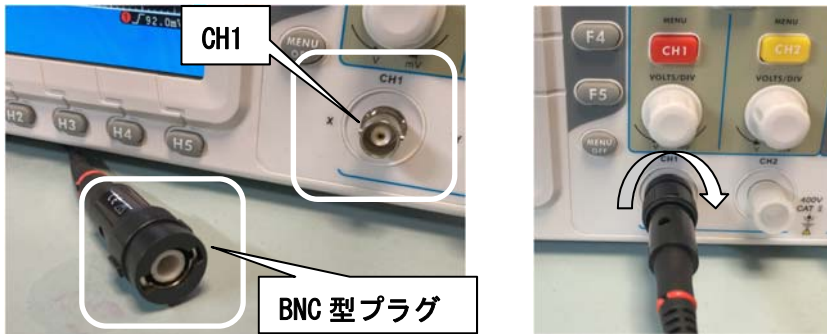
2 カ所ともナットで締める。手でナットを回して締めてから、モーターの軸が鉛直になるように注意しながらナットドライバーで固く締める。

ネジ等をなくしてしまったり、上手く取り付けができなかったりした場合は、番号札を使って監督者に知らせなさい。

## 2. プローブの接続

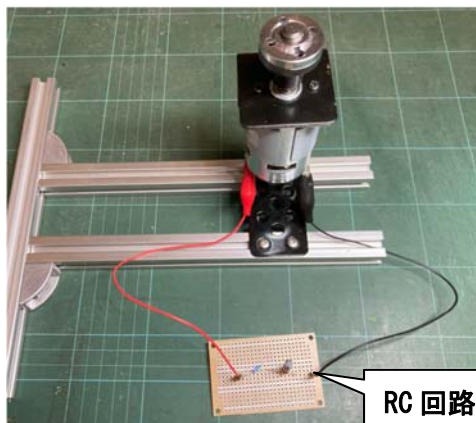
モーターの回転によって生じる誘導起電力をオシロスコープで測定するために、プローブ(赤) (以下、プローブ) を接続する (プローブ(黄)は使用しない)。

- (1) プローブの BNC 型プラグをオシロスコープの CH1 に接続する。



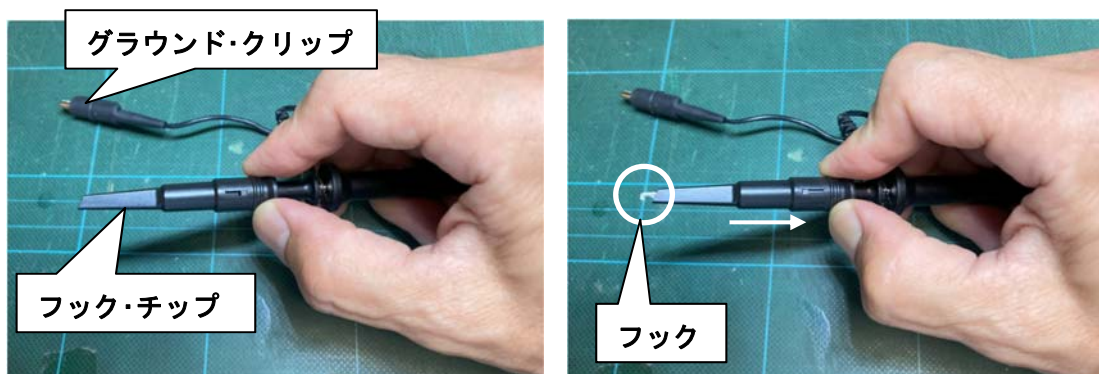
BNC 型プラグの凹部と CH1 の凸部が合うように差し込み、時計回りにカチッと止まるまで回す。

- (2) RC 回路基板のミノムシクリップの赤、黒をモーター出力端子に接続する。

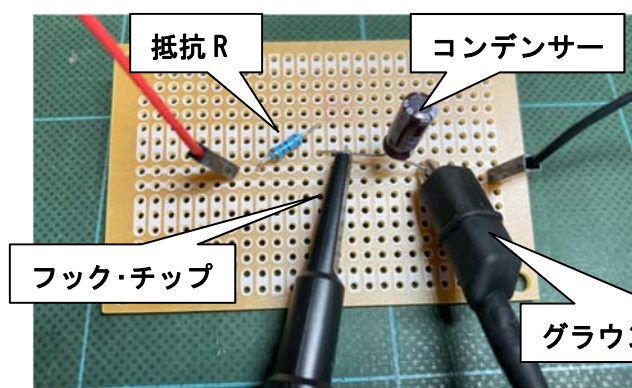


ミノムシクリップの赤、黒はモーター出力端子のどちら側につけてもよいが、ここでは左側を赤、右側を黒としておく。ミノムシクリップの絶縁カバーが滑りやすいので注意すること。

- (3) プローブ先端のフックとグラウンド・クリップのワニロクリップを RC 回路基板上にあるコンデンサーの両端に接続する。



フック・チップを押し下げると (写真では右向きに押す) 測定対象に引っ掛けるフックが出てくる。

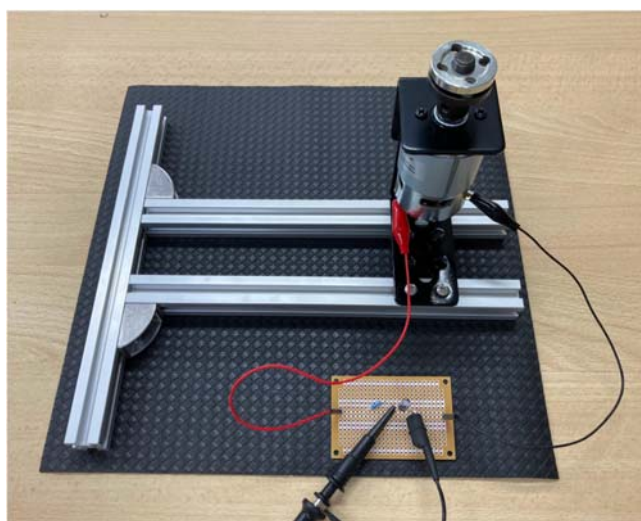


フック・チップ先端のフックとグラウンド・クリップを回路基板上にあるコンデンサーの両端に接続する。左右はどちらでもよいが、ここでは左側にフック、右側にグラウンド・クリップとしておく。



プローブ・ヘッドのスライドスイッチ（赤色）が「10X」側に選択されていることを確認する。「1X」側になっていたら「10X」側に直す。

#### (4) 接続の完了



アルミフレーム台を摩擦シート上に置けば準備完了である。課題 1-1, 1-2 を実行する際は、常にアルミフレーム台を摩擦シート上に置くとよい。

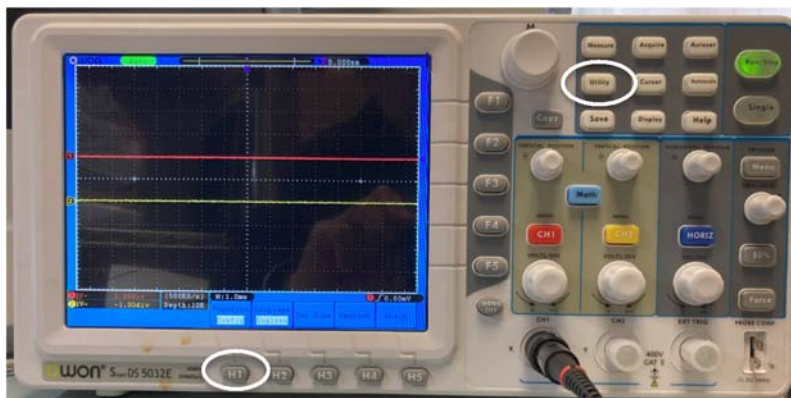
本課題において、プローブを直接モーターの出力端子に接続せず、RC 回路基板を介して接続する理由は付録 B (p.28) に書かれている。

**RC 回路基板が壊れてしまったり、配線が上手くできなかつたりした場合は、番号札を使って監督者に知らせなさい。**

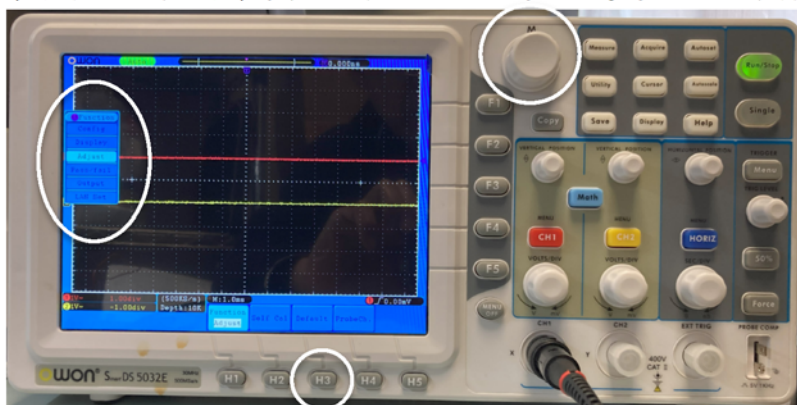


### 3. オシロスコープの初期設定

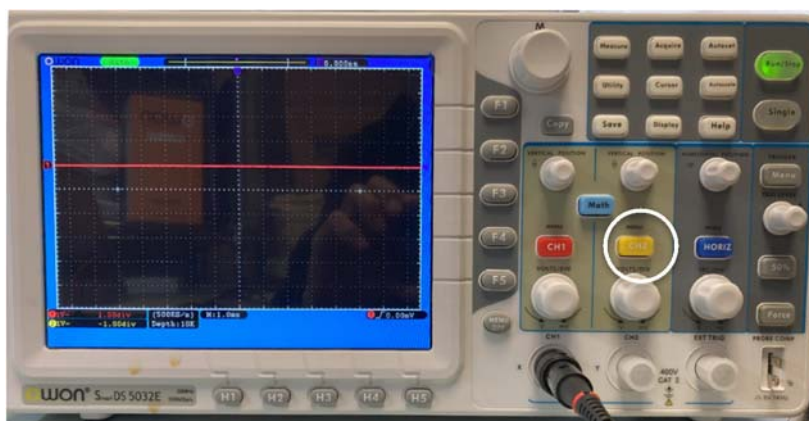
1. 上面左端の電源スイッチを押し、画面が表示されるまで待つ。Utility ボタンを押し、続けて H1(Function)ボタンを押す（電源投入後の初期画面は下の写真と異なる場合もあり、様々である）。



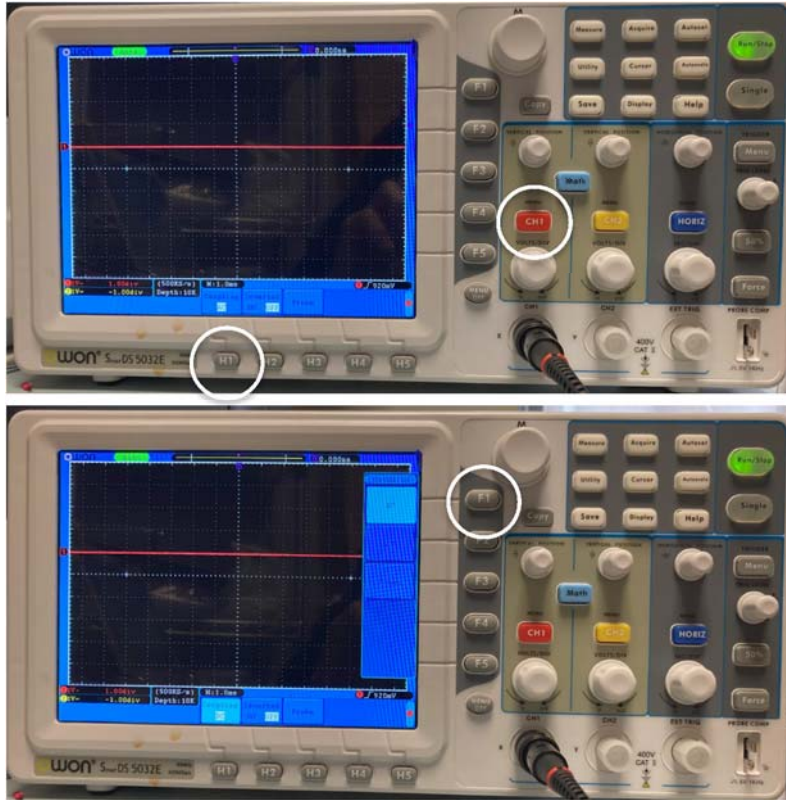
2. 画面左に Function メニューが現れるので、右上の M ダイアル（操作部内左上）を回し、Adjust を選択する。すると画面下の H1 ボタンが Function[Adjust]となり、H3 が Default ボタンとなる。そこで H3(Default)を押すと、カチャッと音がして初期設定され、画面のように赤、黄の2本のラインが現れる。現れない場合は再度 H3 を押す。



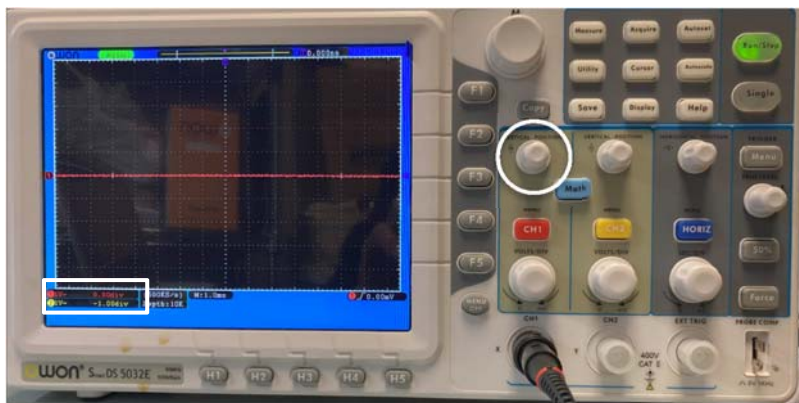
3. CH2 を2度押しすると、黄色のラインが消え、CH1の入力信号だけが表示されるようになる。



4. CH1 を押すと、H1 が Coupling AC と表示されるので、H1(Coupling)を押す。すると画面右側に Coupling メニューが表示されるので、F1(DC)を選択する。特にこの操作は重要である。適切になされないと本課題におけるデータの表示がうまくできない。



5. CH1 VERTICAL POSITION を回して赤色のラインを上下に動かすことができる。下の写真は、原点を画面の中心に設定した場合で、画面左下の表示は「①1V- 0.00div」となっている。原点をさらに下側に取れば、表示される正の領域が増えるので、正のデータの測定精度を上げることができる。



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」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。

## 課題 1-1 慣性モーメントの測定

### 【課題 1-1 の概要】

モーターを回転させると、誘導起電力が生じる。これを利用すると回転の角速度を測定することができる。しかし、モーターの回転する部分(心棒にコイルなどの部品を取り付けたもの。ローター(rotor)ともいうが以下では**回転子**と呼ぶ。)自身も慣性モーメントを持っており、また摩擦があるので、そのトルクのため、回転は減速し、やがて止まってしまう。モーターを回転運動の観測装置として活用するには、モーターの慣性モーメントと摩擦によるトルクを決定することが必要である。課題 1-1 では、慣性モーメントを計算で求めることができる物体(CD)を、慣性モーメントの物差しとして利用することで、これらのパラメータの値を決定する。

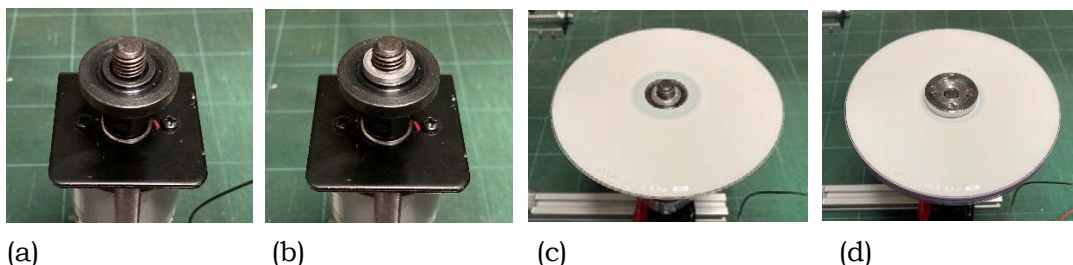
### 問 1-1a

CD1枚が回転するときの慣性モーメント $I_{CD}$ を、その大きさ(外半径と内半径)を定規を用いて計測することにより求めなさい。ただし CD の外半径を $a$ 、内半径を $b$ 、質量を $m$ としたとき、CD の中心を通り CD 面に対して垂直な軸のまわりの慣性モーメント $I_{CD}$ は式(9) (p.10)より、次のように表わされる。5 枚の CD の大きさはすべて同一と仮定して、任意の 1 枚について測定しなさい。また、本課題で使用する CD1 枚の質量は15.0 gであると仮定しなさい。

$$I_{CD} = \frac{1}{2}m(a^2 + b^2)$$

### 【問 1-1b を実行するための準備】

CD を 5 枚コネクティングロッドに取り付ける。写真(a)はロックナット上を取り外し、ロックナット下に取り付けてある状態である。ロックナット下は溝のある側が下側で、コネクティングロッドとかみ合っている。CD の穴の直径はコネクティングロッドの直径よりも大きいので、付属のプラスチックワッシャを写真(b)のようにロックナット下の上にはめてから 1 枚目の CD を取り付ける (写真(c))。残り 4 枚の CD は 1 枚目の CD に合わせるようにして重ね合わせ、できるだけ中心から偏らないように手で CD の周囲を揃えて押さえながら、もう一方の手で上からロックナット上を用いて固定する (写真(d))。その際、ロックナット上の凸部を下に向けるとよい。CD の枚数が 1 枚のときは凸部を上に向けるとよい。



**CD を上手く固定できない場合は、番号札を使って監督者に知らせなさい。**



### 【回転運動の測定原理】

付属のコネクティングロッド付きモーターの回転子にCDを  $n$  枚 ( $0 \leq n \leq 5$ ) 固定し、手で回すなどして外部トルクによって回転させたあと、静止するまでの回転の角加速度を  $\alpha_n$ 、摩擦力によるトルクを  $\tau$  (CDを何枚固定しても変わらないと仮定する) とすれば、式(5) (p.9)より

$$I_n \alpha_n = \tau$$

の回転運動の運動方程式が成り立つ。 $I_n$ は回転子にCDを  $n$  枚取り付けたときの回転体全体の慣性モーメントで、

$$I_n = I_0 + nI_{CD}$$

と表わされる。 $I_0$ はCDを取り付けていない、コネクティングロッド、ロックナットを装着したモーターの回転子の慣性モーメントである。以上より

$$(I_0 + nI_{CD})\alpha_n = \tau \quad (10)$$

の関係が得られる。

DCモーターの回転子が回転すると、モーターの端子間に誘導起電力  $E$  が発生する。その起電力は回転の角速度  $\omega$  に比例することが知られている(付録A (p.27) に、本課題に付属しているDCモーターに生じた起電力  $E$  と角速度  $\omega$  の関係の測定結果を示す)。この関係より、モーターに生じる起電力  $E$  を測定すれば、その瞬間の回転体の角速度  $\omega$  がわかる。

起電力  $E$  と回転の角速度  $\omega$  のあいだに比例関係があるので、起電力  $E$  の時間変化率  $\beta = dE/dt$  は角加速度  $\alpha$  に比例する。比例係数を  $k$  とすれば

$$E = k\omega$$

$$\beta = \frac{dE}{dt} = k\alpha \quad (11)$$

である。

CDを  $n$  枚固定して回転させたときDCモーターの端子間に生じる起電力の時間変化率を  $\beta_n$  と置くと、式(10)より、

$$(I_0 + nI_{CD})\beta_n = T, \quad T = k\tau \quad (12)$$

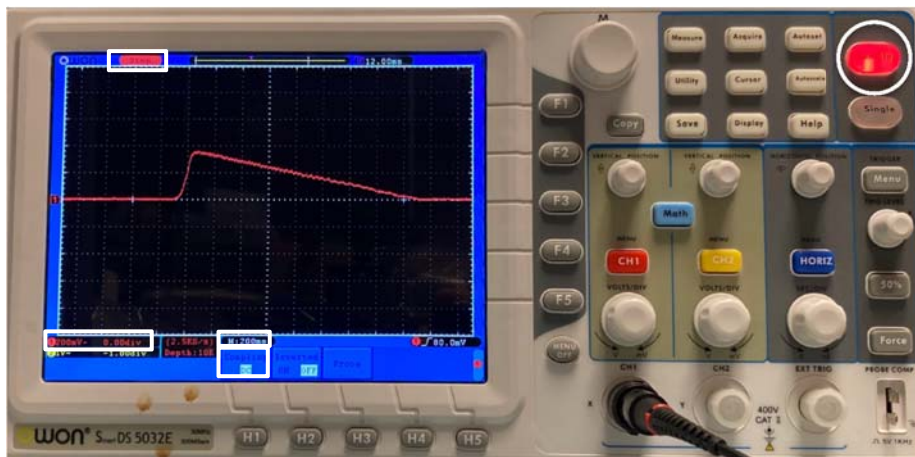
の関係を得る。実験的に  $T$  を決めることができれば、トルクは  $\tau = T/k$  の関係から求めることができる。

### 問 1-1b

CDを5枚、回転子のコネクティングロッドにロックナットで固定し、手でトルクを与えて回転させ、その後起電力が減衰していく過程をオシロスコープで観測する。オシロスコープに表示された起電力  $E$ 、時刻  $t$  のグラフの概形を描き写しなさい。その際、小さなリップル(さざ波、詳しくは付録B(p.28))は無視してよい。また、縦軸、横軸の1マスの設定値を記入しなさい。本課題は、次ページから始まる【起電力の観察】の記述に沿って操作しながら実行しなさい。

## 【起電力の観察】

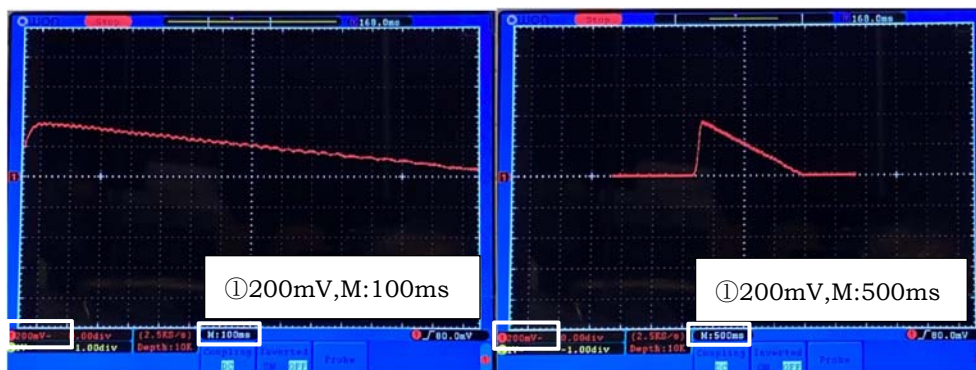
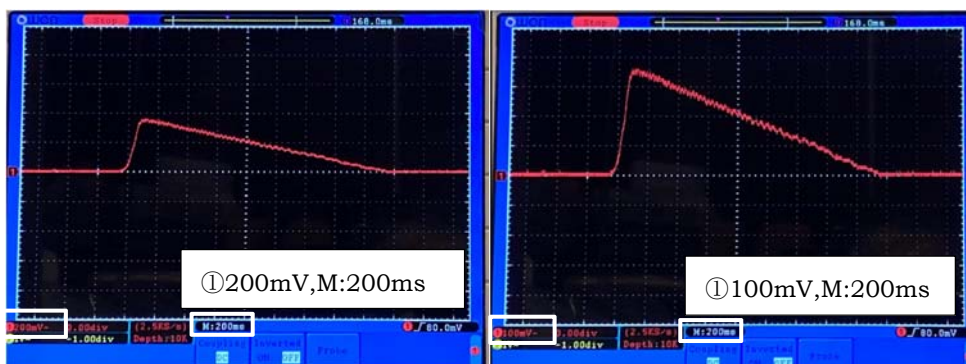
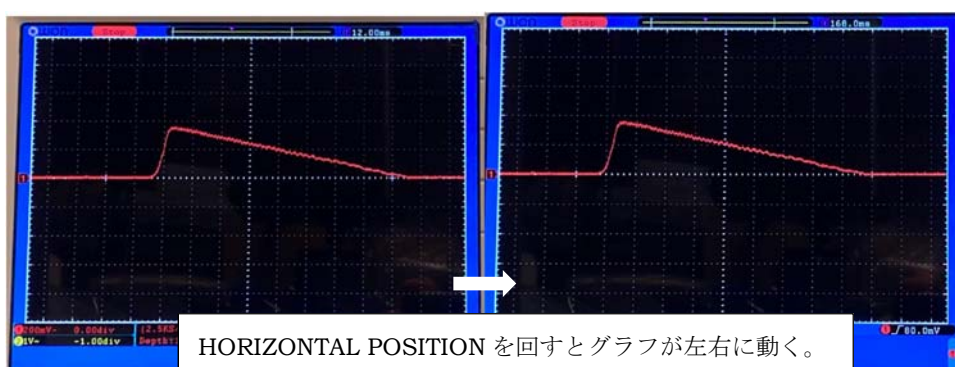
- 縦軸（電圧）と横軸（時間）の1マスの設定
  - CH1のVOLTS/DIVを時計回りに回して「①200mV- 0.00div」の状態にする。  
これで縦軸1マスが200mVに設定された。
  - HORIZのSEC/DIVを反時計回りに回して「M:200ms」とする。これで横軸1マスが200msに設定された。これら1マスの設定は、次に続く測定例に合わせたものである。一般の測定では、状況に応じて縦軸、横軸、それぞれの1マスを設定すること。
- オシロスコープ画面左上が「Scan」状態であることを確認する。CDの周囲部に手を沿え、ロックナットを締めた向きにCDを回転させて手を離す。その際、最大起電力が300mV以上になるようにするとよい。逆向きに回転させてもよいが、その時はロックナットが途中で緩まないように注意すること。
- 測定データが画面中央まで流れてきたところでRun/Stopボタンを押す。この瞬間Run/Stopボタンは緑色から赤色に変わる。オシロスコープ画面左上は「Scan」から「Stop」状態に変わる。また、左下に「①200mV- 0.00div」、中央下に「M:200ms」、[Coupling DC]と表示されていることを確認する。下図の画面と上下が反転している場合には、プローブのフックとグラウンド・クリップを逆に付ければよい。ここで、重要な注意点がある。2.で「M:50ms」以下の設定にしていると「Scan」の表示が「Auto」になってしまう。「Scan」表示にするためには「M:100ms」以上にしなければならない。  
測定を繰り返すときは再度Run/Stopボタンを押す。



測定データが上手く表示されない場合は、番号札を使って監督者に知らせなさい。

4. オシロスコープの画面が 3. のように表示されている状態で、HORIZONTAL POSITION を回してグラフを左右に動かすことができる。また、縦軸、横軸の 1 マスを変更することも可能である。CH1 の VOLTS/DIV を回して縦軸の 1 マスを現在の「200mV」から「100mV」に切り替えると、グラフ全体が縦に 2 倍される。また HORIZ の SEC/DIV を回して、横軸の 1 マスを現在の「M:200ms」から「M:100ms」に切り替えれば、グラフ全体が横に 2 倍に引き延ばされる。「M:500ms」にすると 2/5 倍される。また、【課題 1 の準備】3. オシロスコープの初期設定 5 (p.15)の記述に従って原点を上下させることもできる。問 1-1b では、こうして得られたグラフの概形をオシロスコープから描き写す。

概形を描いたオシロスコープの画面はこの後の問 1-1c で用いるので消さないこと。



### 問 1-1c

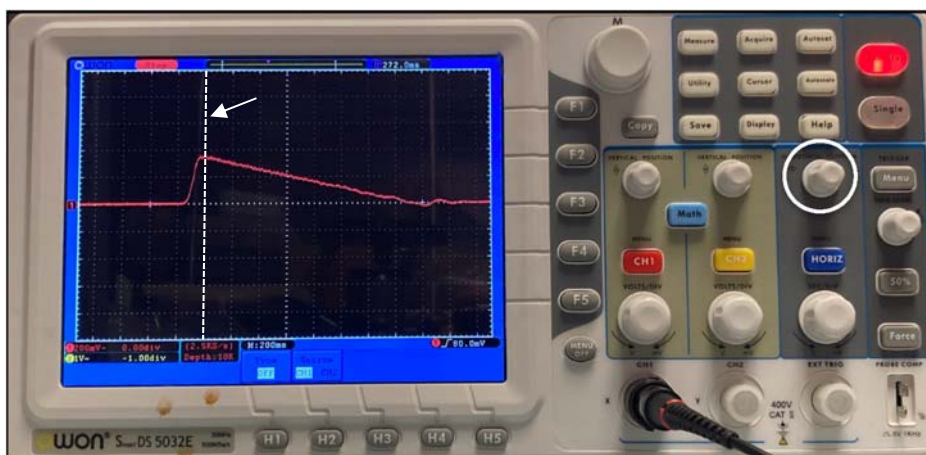
問 1-1b で観察されたオシロスコープの表示より,  $\beta_5$  の絶対値  $|\beta_5|$  を求めなさい。式(11) (p.17) より

$$\beta = \frac{dE}{dt}$$

であるので,  $\beta_5$  は CD を 5 枚回転子に取り付けて回転させて止まるまでの, 起電力  $E$ -時刻  $t$  グラフの傾きである。オシロスコープの画面に表示されたグラフのうち, 傾き一定とみなせる部分 (以下では直線区間と呼ぶ) の両端に近い 2 点の座標を記録し, 2 点を結ぶ直線の傾きを  $\beta_5$  としなさい。2 点の座標は問 1-1b の概形図中にもその位置を図示しなさい。本課題は, 続く【起電力の変化率の測定】の記述に沿って操作しながら実行しなさい。

#### 【起電力の変化率の測定】

1. HORIZONTAL POSITION を回してグラフを動かし, 直線区間内で電圧最大の箇所 (直線区間の左端) を近くのオシロスコープ画面上の縦線 (破線) に合わせる。もちろんどの縦線に合わせるかは任意である。



2. Cursor → H1(Type) → F2(Voltage) と順番に押すとオシロスコープ画面左下に

$\Delta y$ : 0.0mV

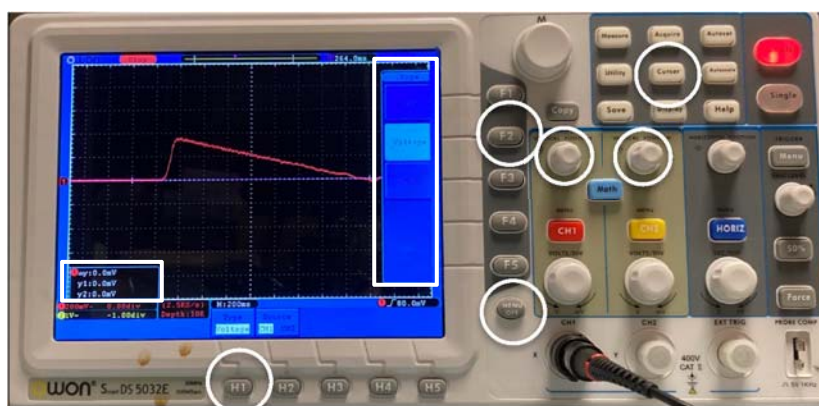
y1 : 0.0mV

y2 : 0.0mV

と表示される。y1, y2は CH1, CH2 の VERTICAL

POSITION を回すと上下に動く水平線 (以下ではy1, y2 のラインと呼ぶ)

が示す縦軸の値である。また,  $\Delta y = y1 - y2$  である。中央下の小さな MENU OFF ボタンを押すと, オシロスコープ画面右側の選択欄が消える。





3. この例では、縦軸の1マスを「100mV」に設定すると計測しやすい。CH1の VERTICAL POSITION を回し、y1のラインを下図の縦線とグラフの交点に持ってくると、画面左下に

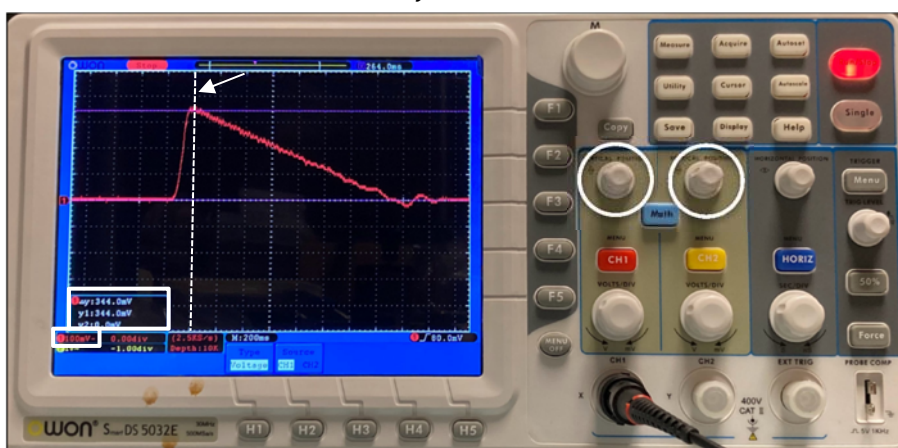
$\Delta y$ : 344.0mV

y1 : 344.0mV

y2 : 0.0mV

と表示される。

このとき  $y2 = 0.0 \text{ mV}$  となっているので、 $\Delta y = y1 - y2 = 344.0 \text{ mV}$  である。CH2の VERTICAL POSITION を回してy2のラインを上下させることもできる。



4. 続いて CH1の VERTICAL POSITION を回し、y1のラインを下図の縦線（直線区間の右端近く）とグラフの交点に持ってくると、この例では画面左下に

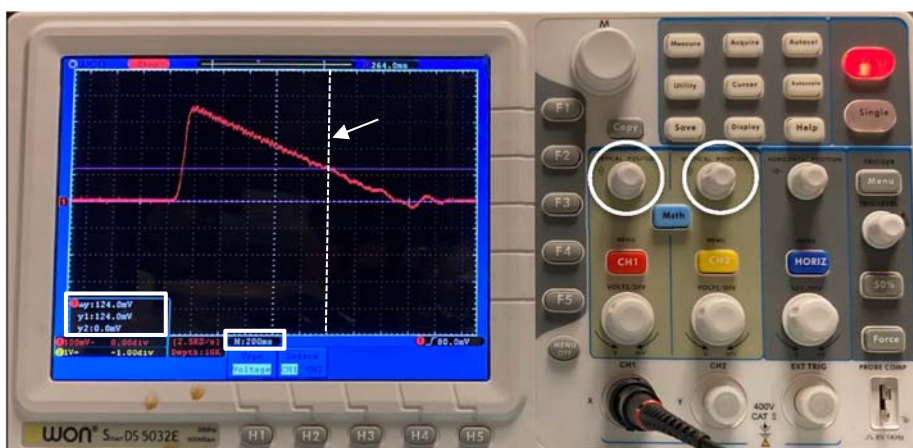
$\Delta y$ : 124.0mV

y1 : 124.0mV

y2 : 0.0mV

と表示される。横軸1マスが200msであるから、3. の時点から5マス分、

$\Delta t = (200 \text{ ms}) \times 5 = 1.00 \text{ s}$  の間に起電力は344.0 mV から124.0 mV まで変化したことになる。



5. 起電力の変化を読み取るだけであれば、CH1のVERTICAL POSITIONを回してy1のラインを3.の縦線との交点に、CH2のVERTICAL POSITIONを回してy2のラインを4.の縦線との交点に持ってくれば、画面左下の表示は

$\Delta y$ : 220.0mV

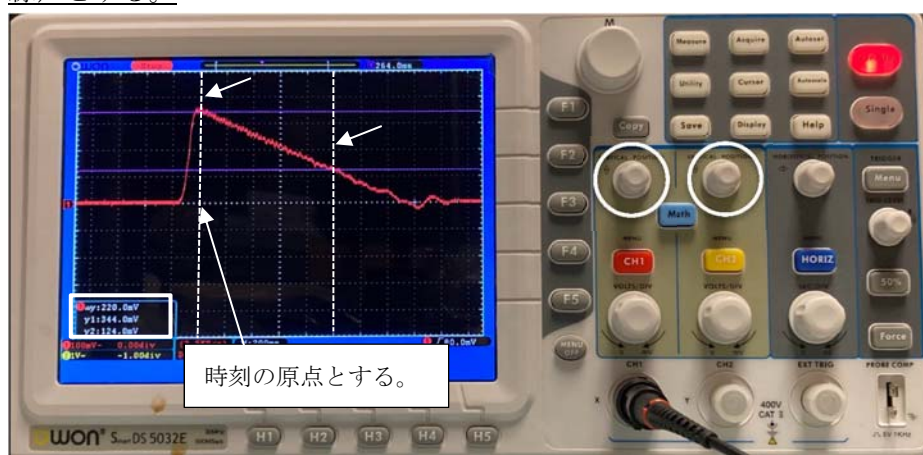
y1 : 344.0mV

y2 : 124.0mV

となり、直接  $\Delta y = y1 - y2 = 220.0 \text{ mV}$  が得られる。

横軸については、適当な縦線を時間の原点とすれば、横軸1マスの値から縦線ごとの時刻がわかる。y1のラインを各縦線とグラフの交点に合わせていけば、1マス分の時刻ごとの起電力を読み取ることができる。

以下の設問においてグラフの座標を求める際には、時刻の原点は1.で選んだ縦線(破線)とする。



### 【モーターの慣性モーメントと摩擦によるトルクの決定】

CD を 5 枚取り付けた回転体（慣性モーメントは  $I_5 = I_0 + 5I_{CD}$ ）の起電力の時間変化率  $\beta_5$  が分かっても、CD を取り付けていない、コネクティングロッド、ロックナット等を装着したモーターの回転子だけの慣性モーメント  $I_0$  と摩擦力によるトルク  $\tau$  の両方を決めることはできない。この両方を決めるために、CD の枚数  $n$  を変えて測定する。

#### 問 1-1d

同様に、 $n = 3, 1$  の場合についても起電力が減衰していく過程をオシロスコープで観測し、問 1-1c と同様に直線区間の傾きの絶対値  $|\beta_n|$  を求めなさい。 $n = 5$  の場合よりも速く減衰するため、直線区間が横軸の 4 マス分を越えるように横軸 1 マスを設定するとよい。この区間の両端付近の 2 本の縦線との交点において起電力と時刻を読み取り、その 2 点を結ぶ直線の傾きを  $\beta_n$  としなさい。

なお、CD1 枚を固定するときは、ロックナットの凸部を上に向けること。

#### 問 1-1e

式(12) (p.17) より  $\beta_n$  の絶対値と  $T$  の絶対値のあいだには、

$$(I_0 + nI_{CD})|\beta_n| = |T|$$

の関係式が成り立つが、これを变形して

$$\frac{1}{|\beta_n|} = \frac{I_0}{|T|} + \frac{I_{CD}}{|T|}n \quad (12')$$

としておくと、 $Y = \frac{1}{|\beta_n|}$  が  $X = n$  の 1 次関数となる。

- (1)  $|\beta_n|$  の欄に問 1-1c～1-1d の結果を転記し、対応する  $Y$  の値を計算して表を完成させなさい。
- (2) 縦軸に  $Y$ 、横軸に  $X$  をとり、得られた表のデータをプロットし、その近似直線  $Y = A + BX$  を描き入れなさい。

#### 問 1-1f

問 1-1e(2) の近似直線より  $I_0$ 、 $|T|$  を求めなさい。また、このとき回転子にはたらく摩擦力によるトルク  $\tau$  の絶対値  $|\tau|$  を求めなさい。

なお式(12)より、 $\tau = T/k$  であり、また、付録 A (p.27) より  $k = 1.10 \times 10^{-2} \text{ V} \cdot \text{s}/\text{rad}$  である。

### 問 1-1g

$|\beta|$ が与えられたとき、回転体全体の慣性モーメント  $I$  は次の関係式で与えられる。

$$I = \frac{\boxed{(1)} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{V/s}}{|\beta|}$$

$\boxed{(1)}$ に入る数値を求めなさい。

### 課題 1-2 角運動量の保存

#### 【課題 1-2 の概要】

フィギュアスケート選手のスピン運動の解明に着手する。モーターの回転子に、CD の代わりに回転台を取り付けて回転させる。回転台にはおもりが取り付けられており、これが内側にあるか外側にあるかで、中心の回りの慣性モーメントが変化する。回転の途中で慣性モーメントが変化したとき、回転の角速度はどうなるであろうか。

#### 【課題 1-2 を実行するための準備】

(1) DC モーターから課題 1-1 で装着したロックナット上とすべての CD， およびプラスチックワッシャを取り外す。続いてロックナット下の上から回転台の中央の穴をコネクティングロッドに通して装着し， その上からロックナット上を締めて固定する。図 1 の様に回転台をロックナット上下で挟んで固定した形になる。

(2) 付属の割棒を 2 個のおもりに挟み込み， 両おもりを図 2 の様に外側に押し広げる。その際， 割棒は， ばね， おもりの貫通軸の直上に貫通軸に沿わせて設置する。また， 割棒の真ん中が回転台の中心に来るように注意する。割棒に付けたタコ糸

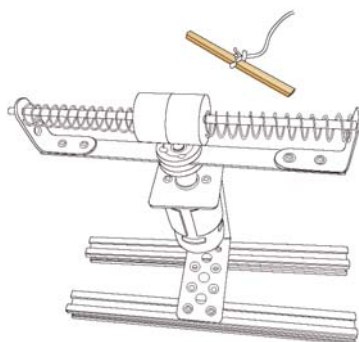


図 1

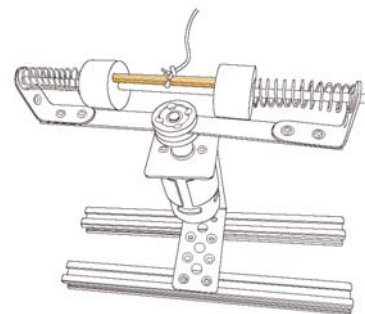


図 2

を上方に引き上げると， ばねにより， 両おもりが中央に押し戻されることを確認する。

(3) 摩擦シートの上に回転台を装着した DC モーターを置き， 割棒をセットし， 一方の手で割棒に取り付けたタコ糸を持ち， 他方の手で回転台を回転させる。その際， タコ糸が回転台に絡まないように， タコ糸を持つ手を回転台の上方に維持する。回転の途中でタコ糸を上方に引き上げると， おもりが瞬時に中央に移動し， 回転台の回転の角速度が変化するのが観察される。

(4) この間の起電力  $E$  の変化をオシロスコープに記録できれば， 必要なデータが得られる。オシロスコープによる測定の手順は課題 1-1 の時と同様である。割棒はいつ引き抜いてもよいが， 引き抜き前後の記録時間が十分確保できるようなタイミングがよいだろう。



### 問 1-2a

回転台を回転させ、適当なところで割棒を引き抜く。課題 1-1 と同様にして割棒引き抜きの前後で、モーターの回転によって生じる起電力の時間変化をオシロスコープで観測する。何回か練習し、起電力の立ち上がりから消滅までがオシロスコープの画面に収まり、割棒引き抜きの前および後の 2 つの直線区間の横幅が、それぞれ、4 マスを越えるようなグラフを実現するとよい。時刻の原点は、引き抜き前の直線区間内に【起電力の変化率の測定】5. の末尾下線部 (p.22) の規則に従って決める。

割棒引き抜き前後で、起電力  $E$ -時刻  $t$  グラフの直線部分の傾き  $\beta$  が変化している。引き抜き前を  $\beta_i$ 、引き抜き後を  $\beta_f$  とする。それぞれの絶対値  $|\beta_i|$ 、 $|\beta_f|$  を問 1-1c、問 1-1d と同様にして求めなさい。

また、 $\beta_i$ 、 $\beta_f$  を求める際に読み取った、それぞれ 2 点の座標を解答用紙に記入し、その位置を、引き抜き前後の 2 本の近似直線とともにグラフ用紙に図示しなさい。

さらに、オシロスコープ画面から、割棒を引き抜いた（起電力が大きく変化した）時刻を読み取り、解答用紙に記入し、その時刻を表す縦線をグラフ中に破線で描き入れなさい。

### 問 1-2b

問 1-1g の関係式を用いて、割棒を引き抜く前後それぞれの回転体の慣性モーメント  $I_i$ 、 $I_f$  を求めなさい。

### 問 1-2c

問 1-2a のグラフにおいて、割棒引き抜き前後の直線区間をそれぞれ延長し、割棒引き抜き時刻の縦線との交点の起電力  $E_i$ 、 $E_f$  を求めなさい。これを割棒引き抜きの直前、直後の起電力と定義しよう。これに対応する直前、直後の回転体の角速度  $\omega_i$ 、 $\omega_f$  を求めなさい。なお、付録 A (p.27) にあるように、DC モーターに生じる起電力  $E$  と回転体の角速度  $\omega$  とのあいだには

$$E = (1.10 \times 10^{-2} \text{ V} \cdot \text{s/rad})\omega = k\omega$$

の関係が成り立つ。

#### 【角運動量保存の法則】

並進運動では、運動量  $p = mv$  を用いると、運動方程式(1) (p.8)は、

$$\frac{dp}{dt} = F$$

と書くことができる。回転運動では、速さ  $v$  および質量  $m$  を角速度  $\omega$  および慣性モーメント  $I$  で置き換えたとき運動量  $p$  に対応する量

$$L = I\omega$$

を**角運動量**という。角運動量を用いると、式(5) (p.9)の回転運動の方程式は

$$\frac{dL}{dt} = \tau$$

とも書くことができる。

物体に働く合力  $F$  が 0 のとき、 $p$  は時間的に一定となり、**運動量保存の法則**が成り立

つと同様に、剛体の各部分に働く外力のモーメントの総和（合トルク） $\tau$  が 0 のとき、 $L$  は時間的に一定となり、**角運動量保存の法則**が成り立つ（詳しい説明は**付録 C** (p.29)にある）。

#### 問 1-2d

問 1-2b, 問 1-2c より、割棒の引き抜き直前、直後における角運動量  $L_i, L_f$  を求め、比較しなさい。

#### 【回転運動のエネルギー】

速さ  $v$  で並進運動する質量  $m$  の物体の運動エネルギーは  $K = \frac{1}{2}mv^2$  である。回転運動では、角速度  $\omega$  および慣性モーメント  $I$  が速さ  $v$  および質量  $m$  に対応するので、回転運動のエネルギーは、 $K_R = \frac{1}{2}I\omega^2$  で与えられる（詳しい説明は**付録 C** (p.29)にある）。

#### 問 1-2e

前問（問 1-2d）の結果に関わらず、ここでは、割棒引き抜きの直前直後で回転体の角運動量  $L = I\omega$  が保存されると仮定しよう。割棒の引き抜きによって慣性モーメント  $I$  が小さくなり、角速度  $\omega$  が大きくなったとき、回転体の運動エネルギーは増えるか減るか、あるいは変わらないか。理由とともに答えなさい。また実験結果はどうであったか、計算して示しなさい。

（課題 1 問題終了）

#### 【課題 1 発展問題】

課題 1 は問 1-2e までです。この後に続く問 1-3a, 問 1-3b は発展問題です。時間に余裕があれば取り組みなさい。発展問題の得点は課題 1, 課題 2 の合計得点に加算されますが、実験問題の満点（200 点）を越えることはありません。

#### 問 1-3a

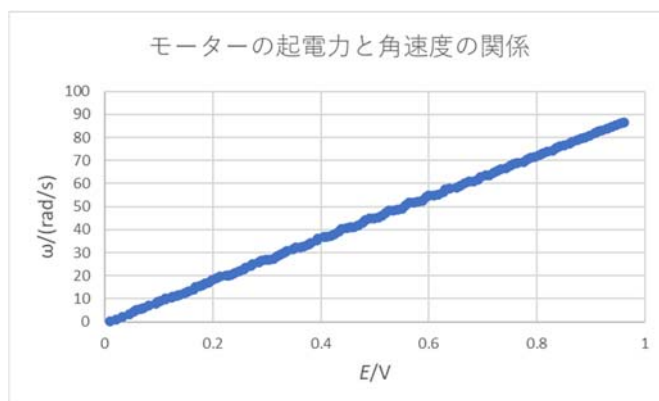
割棒の引き抜き直前直後での回転体の運動エネルギーの増減を、エネルギー保存の法則の立場から説明しなさい。

#### 問 1-3b

問 1-2a の割棒の引き抜き前後のプロットを直線近似した 2 本の直線を、時刻  $t$  が増加する向きに延長していくと、 $E$  が 0 になるところでほぼ交わる。問 1-2a で描いたグラフを改めて描き直し、2 本の近似直線を横軸と交わるまで延長してこれを確認しなさい。また、そうなる理由を説明しなさい。

## 付録A モーターの起電力と角速度の関係

本課題付属のモーターに回転計を取り付け、回転させると、起電力 $E$ と角速度 $\omega$ を同時に測定できる。モーターにトルクを加えて回転させた後、放置すると、モーター内部の摩擦力によるトルクによって回転の角速度は次第に小さくなる。下図は、縦軸に $\omega$ /(rad/s)、横軸に $E$ /Vを取り、回転が止まるまでのあいだの、 $\omega$ と $E$ の関係を表わした測定結果である。



これより

$$E = (1.10 \times 10^{-2} \text{ V}\cdot\text{s/rad})\omega = k\omega$$
$$k = 1.10 \times 10^{-2} \text{ V}\cdot\text{s/rad}$$

が成り立つことがわかる。

ここで求めたように、測定器（として用いるモーター）の目盛り（起電力）と（より）正しい値（角速度）の比例係数  $k$  を定める手続きを検定という。 $k$  の値は、工業製品であるモーターの 1 台ごとに製造時の許容幅を目安として値がばらついていると思われる。これは、物差しなどの測定機器においても同様である。精密な測定にこれらの機器を用いる場合は、実際に使う器具について、使用の直近（できれば直前と直後）に検定を行うべきであるが、今回の物理チャレンジでは、代表として選んだ 1 台について求めた検定値を全員に使っていただくこととした。

## 付録B RC回路基板のはたらき

本課題では RC 回路基板はどのようなはたらきをしているのだろうか。図 1 は RC 回路基板を使わずに、直接プローブをモーター出力端子に接続した様子を示している。



図 1

この状態で付録 B と同様にしてデータを取ると、図 2(a) のようになる。一方、本課題の手順に従って RC 回路基板を介してデータを取ると図 2(b) が得られる。どこに違いがあるだろうか。

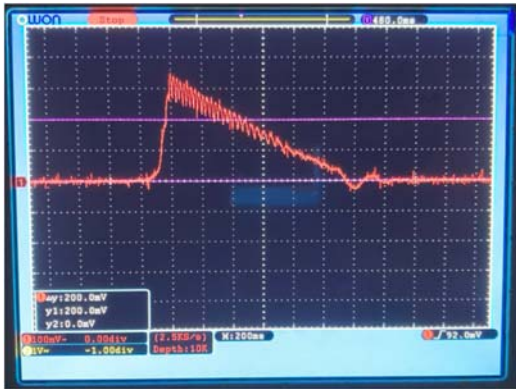


図 2(a)

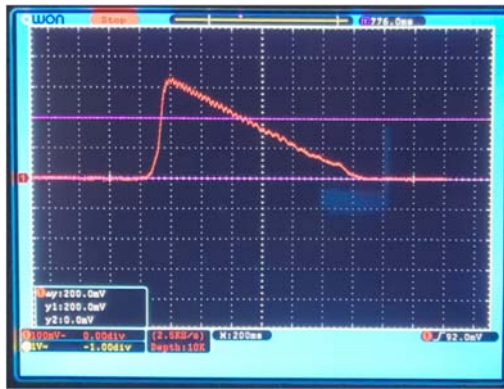
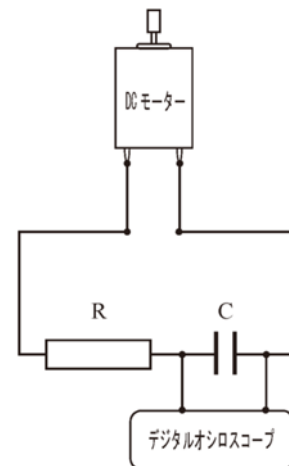


図 2(b)

よく知られているようにモーターは、磁場中のコイルに電流が流れると、電磁力が生じることを利用している。モーターの回転子を外部トルクによって回転させると、コイルを貫く磁束が変化し、誘導起電力が生じる。モーターは発電機にもなる。

本課題で使われている DC モーターは直流モーターで、整流子を取り付けてあるので、生じる起電力の向きは常に一定である。コイルが回転すると、モーター内で磁場を作っている磁極に対するコイルの相対的位置の変化により、誘導起電力に図 2(a) のようなリップル（さざ波）が生じてしまうことが避けられない。RC 回路基板はこのリップルを平滑化し（完全になくすわけではない）、データを読み取りやすくするはたらきがある。

RC 回路基板の回路図は図の通りである。R は 1.8 k $\Omega$  の抵抗、C は 10  $\mu$ F のコンデンサーを使用している。



## 付録C 剛体の回転運動に関する詳しい解説

### ・剛体にはたらくトルク

剛体の回転運動の方程式

$$I\alpha = I \frac{d\omega}{dt} = \tau \quad (5)$$

の右辺は、剛体を構成する各質点（質点  $i$ ）が受けるトルク  $\tau_i = F_{it}r_i$  の総和

$$\tau = \sum_{i=1}^N \tau_i = \sum_{i=1}^N F_{it}r_i$$

である。ここで、 $F_{it}$  は質点  $i$  が受ける合力  $\vec{F}_i$  の接線方向の成分である。

質点  $i$  が受ける合力  $\vec{F}_i$  は、自分 ( $i$ ) 以外のすべての質点  $j$  から受ける力（内力という） $\vec{F}_{ji}$  と剛体の外部から受ける力（外力という） $\vec{F}_{oi}$  の合力である。

$$\vec{F}_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \vec{F}_{ji} + \vec{F}_{oi}$$

質点  $i$  と質点  $j$  が及ぼし合う力  $\vec{F}_{ji}$  と  $\vec{F}_{ij}$  は、**作用・反作用の法則**により、互いに逆向き（反平行）であり、大きさが等しく、共通の作用線（2質点を結ぶ直線）をもつ。それらが剛体の運動に及ぼす効果を考えると、その合力が  $0$  ベクトルとなるだけでなく、作用線が一致しているので、**偶力**にもならず、合トルクも  $0$  となる。よって、剛体内のすべての質点を受ける力もトルクも、総和をとれば、剛体の運動に対する内力の影響は完全に打ち消し合うことになる。

$$\tau = \sum_{i=1}^N \tau_i = \sum_{i=1}^N F_{it}r_i = \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N F_{jit}r_i + \sum_{i=1}^N F_{oit}r_i = \sum_{i=1}^N F_{oit}r_i = \tau_0$$

したがって、剛体の回転運動の方程式(5)の右辺の  $\tau$  は、**外力のトルク**の総和  $\tau_0$  に等しいことが分かる。

### ・剛体の慣性モーメント

剛体を多数 ( $N$  個とする) の質点の集合体と考えたときの慣性モーメントは個々の質点の慣性モーメントの総和として、

$$I = \sum_{i=1}^N m_i r_i^2 \quad (8)$$

で表わされる。 $m_i$  は質点  $i$  の質量、 $r_i$  は回転軸までの距離である。現実には、膨大な数の原子・分子でできている物体を、質量が空間内に連続的に分布していると見なすこと（これを連続体近似という）によって、積分を利用して計算できる。

一様な密度  $\rho$  で、空間の体積  $V$  を占める物体を  $N$  個の微小部分  $1, 2, \dots, i, \dots, N$  に分

け、微小部分  $i$  の体積を  $\Delta V_i$ 、質量を  $\Delta m_i$ 、とすると、微小部分  $i$  をその重心に置かれた質量  $\Delta m_i$  の質点と見なし、その回転軸からの距離を  $r_i$  と置くと、 $\Delta m_i = \rho \Delta V_i$  であるので微小部分  $i$  の慣性モーメントは  $\Delta I_i = r_i^2 \Delta m_i$  となり、 $N$  個の質点の集まりとみなした物体の慣性モーメント  $I_N$  は、その総和

$$I_N = \sum_{i=1}^N \Delta I_i = \sum_{i=1}^N r_i^2 \Delta m_i = \rho \sum_{i=1}^N r_i^2 \Delta V_i$$

で与えられる。

連続体とみなした物体の慣性モーメント  $I$  は  $I_N$  を、 $N \rightarrow \infty$  とすると同時に分割を無限に細かくしたときの極限值となると考えられる。すなわち、

$$I = \lim_{\substack{N \rightarrow \infty \\ \max\{\Delta I_i\} \rightarrow 0}} \sum_{i=1}^N \Delta I_i = \lim_{\substack{N \rightarrow \infty \\ \max\{\Delta m_i\} \rightarrow 0}} \sum_{i=1}^N r_i^2 \Delta m_i = \rho \lim_{\substack{N \rightarrow \infty \\ \max\{\Delta V_i\} \rightarrow 0}} \sum_{i=1}^N r_i^2 \Delta V_i$$

となる。これは、積分記号を用いると、

$$I = \int_{\text{剛体}} dI = \int_M r^2 dm = \rho \int_V r^2 dV$$

と表記される。慣性モーメントは剛体の全質量あるいは占める空間について積分することにより求めることができる。このように、細分した領域についての総和の極限として積分値を定義することを **区分求積法** という。グラフの囲む面積を、短冊の面積の総和の極限として求めるのもその一例である。具体的な計算では、剛体の形状に応じて、積分変数と積分範囲を適切に選ばなければならない。

例として、質量  $m$ 、半径  $r_0$  の密度、厚さが一様な円板の中心を通り、円板に垂直な軸のまわりの慣性モーメントを求めてみよう。

円板を半径  $r_i$ 、微小な幅  $\Delta r_i$  の同心円輪  $N$  個に分割する。半径  $r_i$  の円輪の面積は  $\Delta S_i = 2\pi r_i \Delta r_i$  であるから、その質量  $\Delta m_i$  は

$$\Delta m_i = \frac{\Delta S_i}{\pi r_0^2} m = \frac{2m}{r_0^2} r_i \Delta r_i$$

であり、すべて軸からの距離  $r_i$  にあるので、その慣性モーメント  $\Delta I_i$  は、

$$\Delta I_i = r_i^2 \Delta m_i = \frac{2m}{r_0^2} r_i^3 \Delta r_i$$

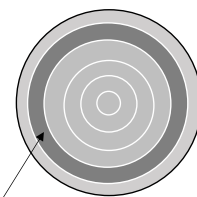
となる。よって、円板の慣性モーメントはその総和の極限、

$$\Delta S_i = 2\pi r_i \Delta r_i$$

$$I = \lim_{\substack{N \rightarrow \infty \\ \max\{\Delta I_i\} \rightarrow 0}} \sum_{i=1}^N \Delta I_i = \lim_{\substack{N \rightarrow \infty \\ \max\{\Delta m_i\} \rightarrow 0}} \sum_{i=1}^N r_i^2 \Delta m_i = \frac{2m}{r_0^2} \lim_{\substack{N \rightarrow \infty \\ \max\{\Delta r_i\} \rightarrow 0}} \sum_{i=1}^N r_i^3 \Delta r_i$$

で与えられる。これを積分で表し、計算すると、

$$I = \frac{2m}{r_0^2} \int_0^{r_0} r^3 dr = \frac{2m}{r_0^2} \frac{r_0^4}{4} = \frac{1}{2} m r_0^2$$



が得られる。

### ・回転の運動エネルギー

角速度  $\omega$  で回転する剛体を  $N$  個の質点の集まりと考える。回転軸からの距離  $r_i$  にある、質量  $m_i$  の質点  $i$  は速度  $v_i = r_i\omega$  で円運動するので、その運動エネルギーは、

$$K_i = \frac{1}{2} m_i v_i^2 = \frac{1}{2} m_i (r_i \omega)^2$$

となる。剛体全体の回転の運動エネルギー  $K_R$  は、

$$K_R = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} m_i v_i^2 = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} m_i (r_i \omega)^2 = \frac{1}{2} \left( \sum_{i=1}^N m_i r_i^2 \right) \omega^2$$

と表わされる。ここで、慣性モーメント  $I = \sum_{i=1}^N m_i r_i^2$  を用いると、

$$K_R = \frac{1}{2} I \omega^2$$

となる。速度  $v$ 、質量  $m$  の物体の並進運動のエネルギー  $K$  は

$$K = \frac{1}{2} m v^2$$

と表わされるので、両式を比較すると、回転運動エネルギーの式に現れる  $I$ 、 $\omega$  はそれぞれ並進運動のエネルギーの  $m$ 、 $v$  に対応していることがわかる。これより、 $I$  は剛体の回転の「慣性」を表わす量であると考えることができる。

### ・角運動量

半径  $r$  の円周上を速さ  $v = r\omega$  で運動する質量  $m$  の質点の運動量  $p = mv$  の中心のまわりのモーメント

$$L = rp = mrv = mr^2\omega$$

を質点の（中心のまわりの）角運動量という。

剛体が角速度  $\omega$  で回転しているとき、質点  $i$  は回転軸のまわりに  $L_i = m_i r_i v_i = m_i r_i^2 \omega$  の角運動量をもつから、剛体全体の角運動量は、

$$L = \sum_{i=1}^N L_i = \sum_{i=1}^N m_i r_i^2 \omega = I \omega$$

と表わされる。

角運動量を用いると、式(5) (p.27)の回転運動の方程式は

$$\frac{dL}{dt} = \tau$$

とも書くことができる。これは、運動量  $p = mv$  を用いて、式(1)の並進運動の方程式を

$$\frac{dp}{dt} = F$$

と書くことに対応している。

物体に働く合力  $F$  が 0 のとき、 $p$  は時間的に一定となり、**運動量保存の法則**が成り立つのと同様に、剛体の各部分に働く外力のモーメントの総和（合トルク） $\tau$  が 0 のとき、 $L$  は時間的に一定となり、**角運動量保存の法則**が成り立つ。

・ 並進運動と回転運動の諸量の対応関係

並進運動	力	質量	速度	運動量	運動エネルギー
	$F$	$m$	$v$	$p = mv$	$K = \frac{1}{2} mv^2$
回転運動	トルク	慣性モーメント	角速度	角運動量	運動エネルギー
	$\tau$	$I$	$\omega$	$L = I\omega$	$K_R = \frac{1}{2} I\omega^2$



## 実験課題 2 発光ダイオードと太陽電池

### 【実験の目的】

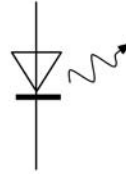
発光ダイオード (Light Emitting Diode: LED) と太陽電池は、電気の通しやすさが金属と絶縁体の中間である半導体を利用した電子部品 (デバイス) である。LED は電気エネルギーを光エネルギーに変換するデバイスであり、太陽電池は逆に光エネルギーを電気エネルギーに変換するデバイスである。LED は、低消費電力で長寿命の光源として、電子機器の動作表示灯のみならず、街路灯や信号機、電光掲示板や大型ディスプレイ等に使われている。太陽電池は、クリーンで持続可能な電源として、電卓や腕時計のみならず、人工衛星やソーラーカー、家庭用発電設備や太陽光発電所等に使われている。本課題は、LED と太陽電池における電流と電圧の測定を通して、両デバイスの仕組みを理解することを目的としている。

## 【実験の準備】

### 1. 部品の特性

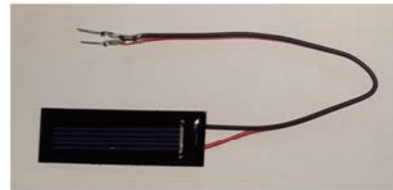
#### ○発光ダイオード (LED)

赤色または青色の端子を電池の+極側につないで適当な電圧をかけると発光する。

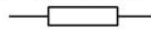


#### ○太陽電池

+極に赤色リード線，-極に黒色リード線がつながれている。

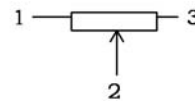


#### ○抵抗：100 Ω



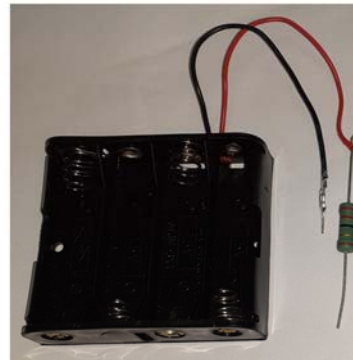
#### ○可変抵抗：1 kΩ

1と3の間の抵抗は常に1 kΩであり，つまみを回すと，1と2の間の抵抗は  $x$  kΩ，2と3の間の抵抗は  $(1-x)$  kΩ になる。ただし， $0 \leq x \leq 1$  である。



#### ○電池ボックス

バネが付いている側に単三の乾電池（約 1.5 V）の一極を入れる。単三の乾電池を4個入れると，乾電池が直列につながれ，約 6 V の電圧をかけることができる。電池の+極には赤色リード線がつながり，このリード線には 22 Ω の抵抗がつながっている。電池の一極には黒色リード線がつながっている。



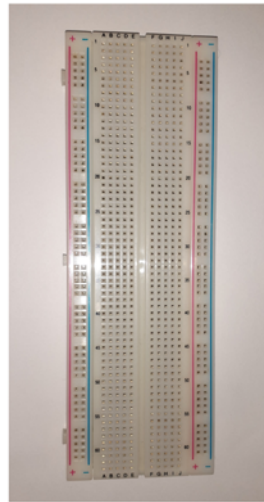
#### ○ジャンパー線

ブレッドボードに差し込み，ブレッドボードの穴同士を電氣的につなぐことができる。



## ○ブレッドボード

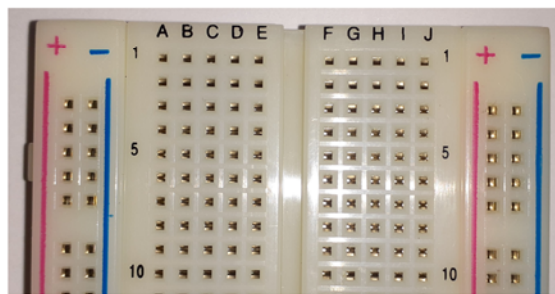
図Aに示すブレッドボード（図Bは上部の拡大図）にある多数の穴は、抵抗やリード線等を差し込む穴である。図Cに示した太い線で結ばれた穴同士は、内部で電気的につながっている。たとえば、ABCDEで示された5つの穴は、図Dに示す内部構造でつながっている。FGHIJで示された5つの穴も同様である。したがって、5Aと5Bと5Cと5Dと5Eはつながっているが、5Aと5Jはつながっていない。5Aと5Jをつなぎたい場合は、たとえば、図Eのように、5Eと5Fをジャンパー線でつなげばよい。5Aと6Aはつながっていない。ブレッドボードの左端と右端にある、+と-で示され2列に並んだ50個の穴は、図Cに示した太い線のように電気的につながっている。ジャンパー線のピンや素子の端子はブレッドボードの穴にまっすぐにしっかりと差し込むことが大事である。ただし、無理に差し込むとピンが折れるので注意すること。



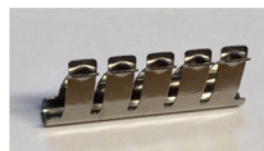
図A



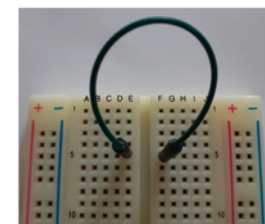
図C



図B



図D



図E

図2-1 部品の特性

## 2. マルチメータの使用法

本課題において電圧計あるいは電流計として用いるマルチメータ（図 2-2）の使用法を説明する。なお、マルチメータの裏側に付いているスタンドを出すと、マルチメータを斜めに立てることができるので、表示が見やすくなる。

### ○「オートパワーOFF 機能」の解除

「オートパワーOFF 機能」は、電源電池の消耗を防止するための機能である。電源 ON 後、約 15 分でブザーが鳴り、パワーOFF になる。しかし、測定の途中でパワーOFF になると、モードとレンジの再設定が必要になるので、はじめにこの機能を解除しておく。

- まず、ロータリースイッチを「電源 OFF」の位置にする。次に、「選択 (SELECT)」ボタンを押しながらロータリースイッチを「電源 OFF」以外の位置に回す。表示の左下の時計マークが消えたらすぐに、「選択 (SELECT)」ボタンから指を離す。離すのが遅れると時計マークが消えないので、そのときは「電源 OFF」にしてやり直すこと。以降、時計マークが消えていれば、「オートパワーOFF 機能」は解除されている。ロータリースイッチを「電源 OFF」以外の位置に回しても、「オートパワーOFF 機能」は解除されたままである。
- 一度ロータリースイッチを「電源 OFF」にした後に「ON」にすると、「オートパワーOFF 機能」が復活するので、上の操作が必要になる。そのため、実験終了時以外は、「電源 OFF」にしない方がよい。



図2-2 マルチメータ。

電池マークが表示されていれば、電源電池が消耗しているので、番号札を使って監督者に知らせなさい。

### ○電圧計として用いる場合

- 赤色の測定プローブを左下の赤色の電圧測定用入力ジャックに深く差し込む。
- 黒色の測定プローブを下中央の黒色の「コモン」入力ジャックに深く差し込む。

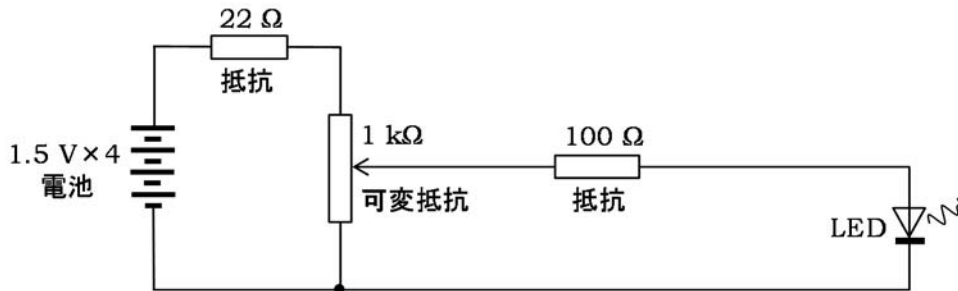
- ・ロータリースイッチを回して、「直流 V」モードを選択する。
- ・何もしないと AUTO レンジになり，測定値に応じてレンジが変わり，下位桁の数値が変動することがあり読みにくい。必ず「レンジ (RANGE) 切換」ボタンを押して，最小電圧 0.01 V まで測定できるレンジを選択する。

#### ○電流計として用いる場合

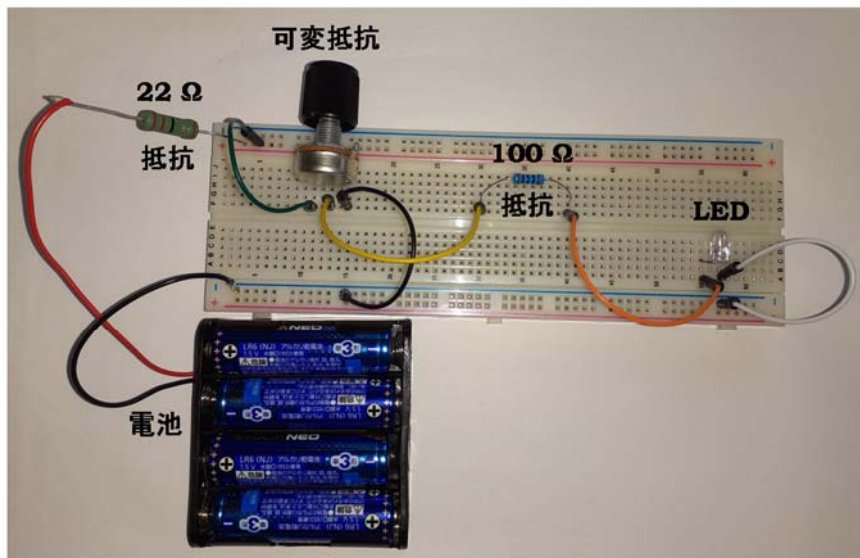
- ・赤色の測定プローブを右下の赤色の電流「 $\mu\text{A}/\text{mA}$ 」測定用入力ジャックに深く差し込む。
- ・黒色の測定プローブを下中央の黒色の「コモン」入力ジャックに深く差し込む。
- ・ロータリースイッチを回して、「電流 mA」モードを選択する。
- ・何もしないと AUTO レンジになり，測定値に応じてレンジが変わり，下位桁の数値が変動することがあり読みにくい。必ず「レンジ (RANGE) 切換」ボタンを押して，最小電流 0.01 mA まで測定できるレンジを選択する。
- ・表示の左上に「DC」あるいは「AC」と表示されている。これが「AC」になっている場合は，「選択 (SELECT)」ボタンを押して「DC」にする。

## 【課題 2-0 (準備課題) LED の発光】

はじめに、LED の発光を確認しよう。図 2-3(a)は、LED と抵抗体を直列につないだ回路の両端に直流電圧を加える回路である。可変抵抗のつまみを回して抵抗の分割位置を変えると、LED に加わる電圧が変化する。



(a)



(b)

図2-3 (a)LEDの発光用の回路図。(b)ブレッドボードを使った配線。

以下に述べる手順にしたがって、図 2-3(a)の回路を図 2-3(b)のように組み立てなさい。

<回路組み立ての手順>

- ① ブレッドボードの J11 と J13 と J15 の穴に可変抵抗の 3 本の端子を深く差し込みなさい。3 本の端子が見えなくなるように、しっかりと押し込みなさい。
- ② 100 Ω の抵抗の端子を曲げて、G30 と G40 に差し込みなさい。
- ③ LED の赤色または青色に色付けされた端子を C55 に差し込み、色付けされていない端子を C57 に差し込みなさい。
- ④ ジャンパー線を使って、F11 とブレッドボードの上側の + (どの穴でもよい) を電氣的

につなぎなさい。

- ⑤ ジャンパー線を使って、F15 とブレッドボードの下側の－（どの穴でもよい）を電氣的につなぎなさい。
- ⑥ ジャンパー線を使って、F13 と F30 を電氣的につなぎなさい。
- ⑦ ジャンパー線を使って、F40 と A55 を電氣的につなぎなさい。
- ⑧ ジャンパー線を使って、A57 とブレッドボードの下側の－（どの穴でもよい）を電氣的につなぎなさい。
- ⑨ 電池ボックスに単三の乾電池 4 個を正しい向きに入れなさい。そして、マルチメータの赤色の測定プローブを電圧測定用入力ジャックに深く差し込み、黒色の測定プローブを「コモン」入力ジャックに深く差し込み、「直流 V」モードにして、電池ボックスから出ているリード線の両端の電圧を測定し、6 V 以上の電圧が出ていることを確認しなさい。確認できない場合は、番号札を使って監督者に知らせなさい。
- ⑩ 電池ボックスのリード線につながれている  $22 \Omega$  の抵抗の端子をブレッドボードの上側の＋（どの穴でもよい）に差し込みなさい。なお、この端子は課題 2 の実験が終了するまで抜かないこと。
- ⑪ 電池ボックスの黒色のリード線をブレッドボードの下側の－（どの穴でもよい）に差し込みなさい。なお、このリード線は課題 2 の実験が終了するまで抜かないこと。

LED の片方の端子は、発光色を区別するために色付けされている。2 本の端子のうち、色付けされた端子を電池の＋極側につなぐ場合を順方向と呼び、このとき LED は発光する。一方、色付けされていない端子を電池の＋極側につなぐ場合を逆方向と呼び、このときは発光しない。図 2-3(a)は順方向の配線を表す。

## 問 2-0

LED に順方向の電圧を加え、LED の発光を確認しなさい。LED を差し替え、赤色 LED 2 個と青色 LED 2 個のすべてについて確認し、確認できれば解答用紙に○印を記入しなさい。

発光しない場合は、配線間違い、あるいは、ジャンパー線のピンや可変抵抗、抵抗、LED の端子のブレッドボードの穴への差し込み不足の可能性がある。何度か抜き差しして、よく確認しなさい。また、LED の 2 本の端子を入れ替えてみなさい。それでも発光が確認できない、あるいは LED の赤と青の区別が困難な場合は番号札を使って監督者に知らせなさい。



## 【課題 2-1 LED の電流-電圧特性】

LED に流れる電流と LED にかかる電圧の関係（電流-電圧特性）を測定しよう。図 2-4 は、図 2-3(a)の回路に電圧計（以下では、用いる電圧計の内部抵抗は十分に大きいと仮定しなさい）2 台をつないだものである。可変抵抗のつまみを右あるいは左に回しきると、LED に流れる電流は最大になる。このときの電流を  $I_{\max}$  とする。

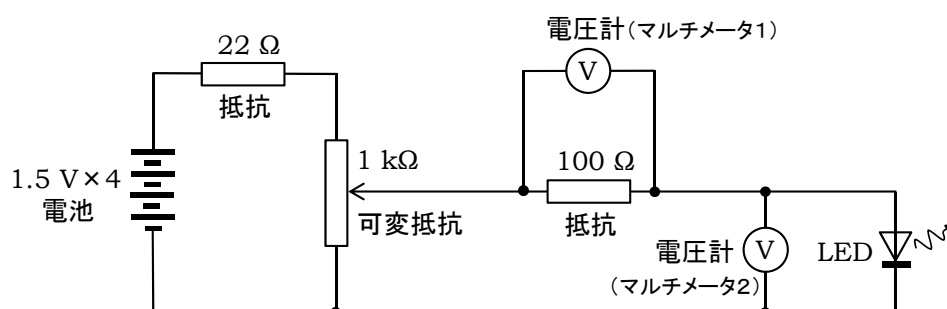


図2-4 LEDの電流-電圧特性を測定するための回路図。

### 問 2-1a

LED に流れている電流を決める方法を簡潔に説明しなさい。

### 問 2-1b

赤色 LED1 個と青色 LED1 個について、発光が観測される順方向に電圧を加え、LED の電流-電圧特性を測定し、電流と電圧の測定値を解答用紙に記録しなさい。次に、解答用紙の方眼紙を使って、赤色 LED1 個と青色 LED1 個の測定値を横軸が電圧、縦軸が電流の一つのグラフに記号を変えてプロットし、それぞれの測定点をなめらかな曲線で結びなさい。

測定点の数は各 LED について  $I_{\max}$  を含む 5 点から 10 点程度でよいが、電流がゼロから  $I_{\max}$  までの振る舞いがわかるように、測定点の場所は適切に選びなさい。

なお、電圧計にはマルチメータを使い、図 2-5 のように、マルチメータの測定プローブのクリップでジャンパー線の一方のピンをはさみ、他方のピンをブレッドボードの適切な穴（100  $\Omega$  の抵抗用のマルチメータ 1 は J30 と J40、LED 用のマルチメータ 2 は B55 と B57）に差し込みなさい。そして、マルチメータ 1 も 2 も「直流 V」モードにして、最小電圧 0.01 V まで測定できるレンジを選択して測定しなさい。

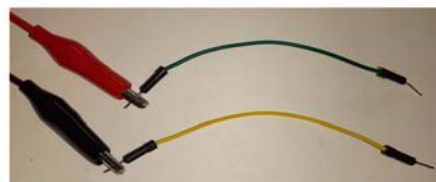


図2-5 測定プローブとジャンパー線の接続。

発光が確認できない場合、あるいは、マルチメータの値が大きく変動して安定しない場合は、ジャンパー線や可変抵抗の接触不良によることがあるので、何度か抜き差ししてみなさい。可変抵抗はしっかりと押し込んでみなさい。それでも改善しない場合は、番号札を使って監督者に知らせなさい。



## LEDの原理

LEDは、n型半導体とp型半導体を接合したダイオードである。n型半導体では、電流を担う荷電粒子（キャリアと呼ばれる）は電子（自由電子と呼ばれる）であり、自由電子は負の電荷を持っている。一方、p型半導体では、キャリアは電子が抜けた穴（ホールあるいは正孔と呼ばれる）であり、ホールは正の電荷を持っていると考えることができる。LEDに順方向の電圧を加えると、図2-6(a)のように、n型部の自由電子は接合部を通り抜けて、p型部のホールと出会い、また、p型部のホールは接合部を通り抜けて、n型部の自由電子と出会い、それぞれ結合（再結合と呼ばれる）して発光し、キャリアは消える。再結合によってキャリアが消えても、電極からは新たにキャリアが供給されるため、電流は流れ続け、発光は持続する。これがLEDの原理である。一方、LEDに逆方向の電圧を加えると、図2-6(b)のように、n型部の自由電子とp型部のホールは互いに離れるように移動し、接合部付近にはキャリアがほとんどなくなり、電流はほとんど流れない。このように、LEDには整流作用がある。

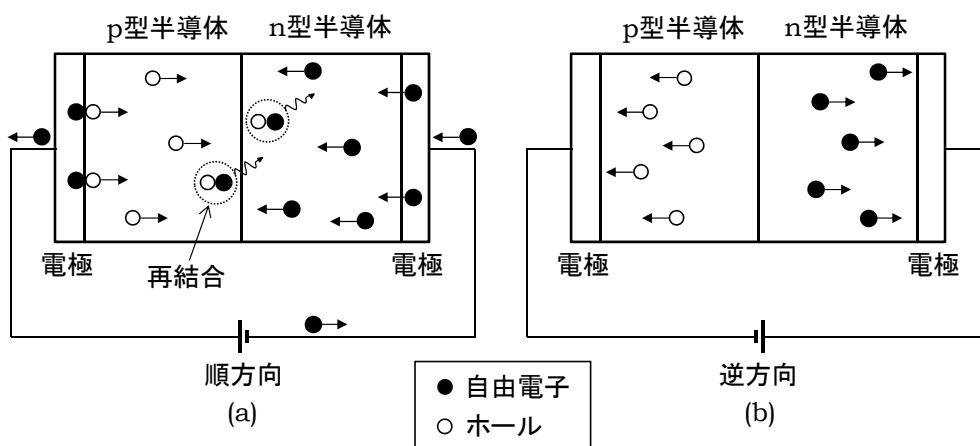


図2-6 n型半導体とp型半導体を接合したLEDにおいて、(a)順方向と(b)逆方向に電圧を加えた場合の、自由電子とホールの動きの模式図。

ここで、LEDの原理を、図2-7を用いて詳しく説明しよう。図2-7(a)は、接合部付近における電子とホールのエネルギー準位を表す。上のエネルギーバンド（エネルギー準位の集まり）と下のエネルギーバンドの間にはエネルギー準位がなく、電子が存在できないエネルギー範囲、すなわち、エネルギーギャップ（大きさ： $E_{\text{gap}}$ ）がある。上のエネルギーバンドにある電子は、自由電子として電場と反対向きの力を受ける。また、下のエネルギーバンドには電子がほぼ詰まっているが、電子が抜けた穴（ホール）には電場と同じ向きの力が働く。電子はエネルギーバンド内ではエネルギーが低い準位にいるのが安定である。したがって、電子が抜けた穴（ホール）はエネルギーバンド内ではエネルギーが高い準位にいるのが安定である。また、接合部をはさんでエネルギーバンドは  $E_{\text{gap}}$  程度の段差を持つ。（注：問2-1dの後に補足説明がある。）

順方向に電圧  $V$  を加えた場合、エネルギーバンドの段差は  $E_{\text{gap}} - eV$  程度となり、 $V$  の増加とともに小さくなっていく。ここで、 $e$  は電気素量である。そして、 $V$  がおおよそ

$E_{\text{gap}}/e$  になると、図 2-7(b)のように、段差がほとんどなくなるので、自由電子とホールは接合部を通り抜けることが可能になり、通り抜けた先で再結合し、両キャリアは消える。再結合は、上のエネルギーバンドの電子が下のエネルギーバンドの電子が抜けた穴を埋めることであり、このとき電子が失ったエネルギー  $E_{\text{gap}}$  が光のエネルギー  $h\nu$  に変換され、発光が起こる。ここで、 $h$  はプランク定数、 $\nu$  (ギリシャ文字のニューであり、ヴイではない) は光の振動数であり、エネルギー保存則より、 $h\nu = E_{\text{gap}}$  の関係が成り立つ。光のエネルギー  $h\nu$  は、光を粒子 (光子あるいは光量子と呼ばれる) と考えたときの光子 1 個のエネルギーであり、光のパワーは単位時間あたりの光子数によって決まる。

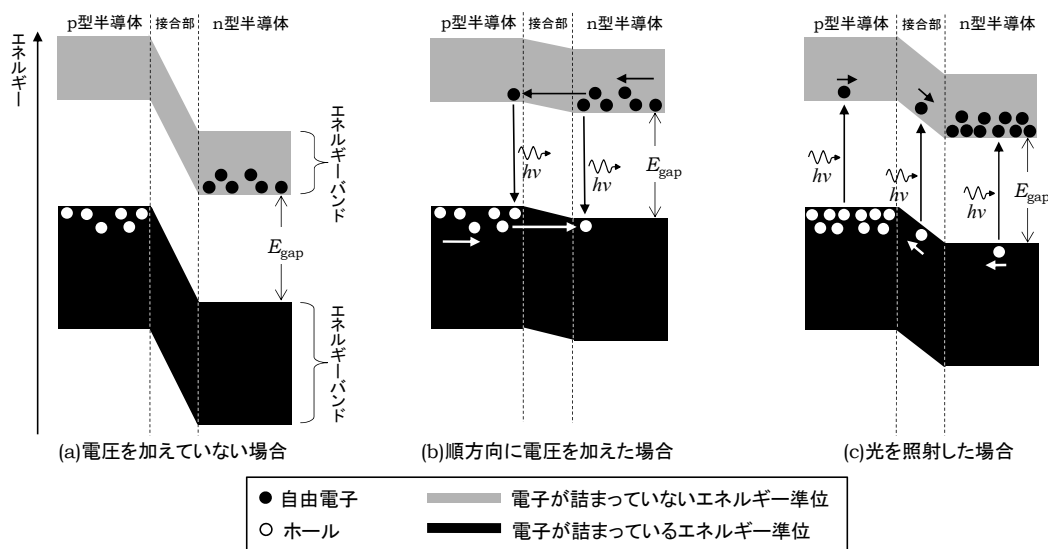


図2-7 n型半導体とp型半導体の接合部付近における電子とホールのエネルギー準位。

- (a) 電圧を加えていない場合。
- (b) 順方向に電圧を加え、再結合によって発光する場合。
- (c) 課題2-2で説明する光の吸収により、下のエネルギーバンドの電子が上のエネルギーバンドに励起され、n型半導体とp型半導体の間に電位差が生じる場合。

### 問 2-1c

問 2-1b で描いたグラフから、電流が 10 mA 流れたときの、赤色 LED にかかった電圧  $V_R$  と青色 LED にかかった電圧  $V_B$  を求めなさい。ただし、0.1 V の桁まででよい。ここで、 $V_R$  と  $V_B$  の添え字 R と B は、それぞれ、赤色 (Red) LED と青色 (Blue) LED を表す。

### 問 2-1d

問 2-1c で求めた電圧  $V_R$  と  $V_B$  の値がおおよそ  $E_{\text{gap}}/e$  であるとして、赤色 LED と青色 LED から放射された赤色の光と青色の光のそれぞれの波長  $\lambda$  のおおよその値を求めなさい。なお、光の速さを  $c$  とすると、 $\lambda = c/\nu$  である。また、 $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ 、 $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ 、 $c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$  としなさい。

### ＜補足説明＞

接合部をはさんでエネルギーバンドに段差が生じることは、次のように理解できる。接合部の n 型部の自由電子と p 型部のホールは、それぞれ、接合で隔てられた p 型部と n 型部に拡散し、再結合する。その結果、接合部付近にキャリアがほとんど存在しない層（空乏層と呼ばれる）が形成され、n 型部の空乏層には正イオン（n 型半導体に含まれる不純物原子のイオン）が残り、p 型部の空乏層には負イオン（p 型半導体に含まれる不純物原子のイオン）が残るため、n 型部から p 型部に向かう電場ができる。この電場によって、自由電子とホールの拡散は止まり、自由電子とホールのエネルギー準位がおおよそ一致するようになるからである。

### 【課題 2-2 光を受けた LED の起電力】

太陽電池も、LED と同じく n 型半導体と p 型半導体を接合したダイオードである。太陽電池が光を受けると、図 2-7(c)のように、下のエネルギーバンドにある電子が光を吸収して上のエネルギーバンドに励起されて自由電子となり、下のエネルギーバンドにホールが生成される。自由電子はエネルギーの低い準位がある n 型半導体に集まり、ホールはエネルギーの高い準位がある p 型半導体に集まるので、両者の間に電位差が生じる。これが太陽電池の原理である。すなわち、LED の発光と逆の過程が太陽電池で起こっている。なお、太陽電池におけるエネルギーギャップを  $E_{\text{gap,S}}$  とすると、太陽電池の電極間の電位差（起電力）の大きさは、おおよそ  $E_{\text{gap,S}}/e$  である。ここで、 $E_{\text{gap,S}}$  の添え字 S は太陽電池 (Solar Cell) を表す。（注：問 2-2b の後に補足説明がある。）

LED も太陽電池と同じくダイオードであるので、LED が光を受けても、起電力の発生が期待できる。そこで、「図 2-4 の回路」中の LED が放射した光を別の LED で受けて、起電力を測定しよう。図 2-8 は、光を受ける LED の起電力を測定する回路である。LED が放射する光は指向性が高いので、図 2-9 のように、光を受ける LED の端子をブレッドボードの H55 と H57（あるいは I55 と I57）に差し込み、LED の頭部同士を向かい合わせて接近させなさい。なお、光を受ける LED の起電力の測定にはマルチメータ 2 を用い、マルチメータ 2 の測定プローブにつないだジャンパー線のピンを、ブレッドボードの J55 と J57 に差し込みなさい。一方、100 Ω の抵抗の両端に接続したマルチメータ 1 はそのまま用いなさい。

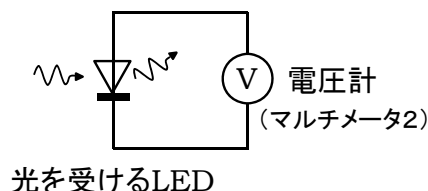


図2-8 光を受けるLEDの起電力測定用の回路図。

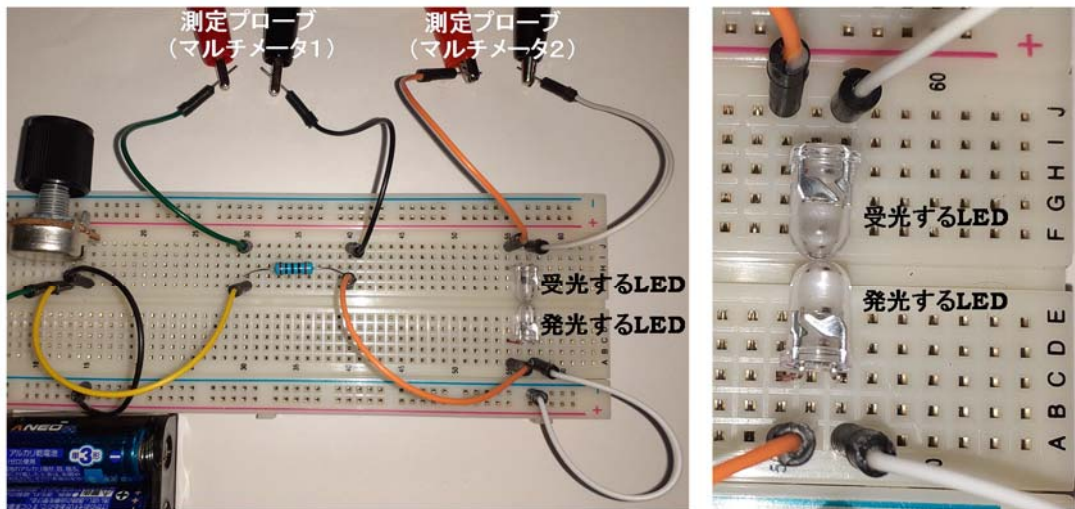


図2-9 頭部同士を接近させた二つのLED。

### 問 2-2a

赤色 LED に最大の電流  $I_{\max,R}$  を流し、 $I_{\max,R}$  を測定しなさい。放射された光をもう 1 個の赤色 LED と青色 LED で受けて、それぞれ、光を受けた赤色 LED の起電力  $V_{R \rightarrow R}$  と青色 LED の起電力  $V_{R \rightarrow B}$  を測定しなさい。そして、すべての測定値を解答用紙の表に記録しなさい。

測定に際しては、マルチメータ 1 も 2 も「直流 V」モードにして、最小電圧 0.01 V まで測定できるレンジを選択しなさい。起電力は LED の頭部同士の位置と向きで変化するので、大きくなるように調整し、そのときの値を 0.1 V の桁まで記録すればよい。 $I_{\max,R}$  は 1 mA の桁まで記録すればよい。

次に、青色 LED に最大の電流  $I_{\max,B}$  を流し、 $I_{\max,B}$  を測定しなさい。放射された光をもう 1 個の青色 LED と赤色 LED で受けて、それぞれ、光を受けた青色 LED の起電力  $V_{B \rightarrow B}$  と赤色 LED の起電力  $V_{B \rightarrow R}$  を測定しなさい。そして、すべての測定値を解答用紙の表に記録しなさい。マルチメータの設定と解答用紙の表への記録は本問の前半と同様にしなさい。

マルチメータの値が大きく変動して安定しない場合は、ジャンパー線や可変抵抗の接触不良によることがあるので、何度か抜き差ししてみなさい。可変抵抗はしっかりと押し込んでみなさい。それでも改善しない場合は、番号札を使って監督者に知らせなさい。

### 問 2-2b

問 2-2a で得られた起電力の測定結果のなかで、起電力が 0.1 V 以下の場合がある。問 2-1c で得られた電圧  $V_R$  と  $V_B$  の値を考慮して、その理由を簡潔に説明しなさい。

### <補足説明>

太陽電池の起電力の大きさは、次のように理解できる。太陽電池では、光のエネルギーを吸収し、p型半導体に生成された自由電子がn型半導体を集まると、n型部の空乏層の正イオンが減少する。一方、n型半導体に生成されたホールはp型半導体を集まるため、p型部の空乏層の負イオンが減少する。その結果、接合部におけるn型部からp型部に向かう電場は小さくなり、n型半導体とp型半導体の間のエネルギーバンドの段差が小さくなる。すなわち、図2-7(b)のように、順方向に電圧を加えたような状態になる。そして、光が十分に強い場合は、順方向におおよそ  $E_{\text{gap,S}}/e$  の電圧がかかった状態と同じになるので、太陽電池の起電力の大きさはおおよそ  $E_{\text{gap,S}}/e$  となる。

### 【課題 2-3 太陽電池の電流-電圧特性】

太陽電池もLEDと同じくダイオードであるので、課題2-1で測定したLEDの電流-電圧特性と似た特性が、太陽電池でも期待できる。そこで、「図2-4の回路」を用い、LEDを太陽電池に替えて、太陽電池の電流-電圧特性を測定しよう。課題2-2で使った発光するLEDと受光するLEDをブレッドボードから外し、太陽電池に順方向の電圧を加えるために、太陽電池の赤色のリード線をブレッドボードのC55に差し込み、黒色のリード線をC57に差し込みなさい。太陽電池にかかる電圧の測定にはマルチメータ2を用い、マルチメータ2の測定プローブにつないだジャンパー線のピンを、それぞれブレッドボードのB55とB57に差し込みなさい。

#### 問 2-3a

太陽電池に順方向の電圧を加え、太陽電池の電流-電圧特性を測定し、電流と電圧の測定値を解答用紙に記録しなさい。次に、解答用紙の方眼紙を使って、測定値を横軸が電圧、縦軸が電流のグラフにプロットし、測定点をなめらかな曲線で結びなさい。

測定点の数は最大の電流  $I_{\text{max,S}}$  を流した場合を含む5点から10点程度でよいが、電流がゼロから  $I_{\text{max,S}}$  までの振る舞いがわかるように、測定点の場所は適切に選びなさい。

なお、測定に際しては、マルチメータ1も2も「直流V」モードにして、最小電圧0.01Vまで測定できるレンジを選択しなさい。また、電圧を加えても急激な電流の増大が観測されない場合は、太陽電池の2本のリード線を差し込むブレッドボードの穴を入れ替えてみなさい。

太陽電池に流れる電流の最大値が **10 mA** 以下の場合、あるいは、マルチメータの値が大きく変動して安定しない場合は、ジャンパー線や可変抵抗の接触不良によることがあるので、何度か抜き差ししてみなさい。可変抵抗はしっかりと押し込んでみなさい。それでも改善しない場合は、番号札を使って監督者に知らせなさい。

#### 問 2-3b

問2-3aで描いたグラフから、電流が10mA流れたときの、太陽電池にかかった電圧  $V_S$  を求めなさい。ただし、0.1Vの桁まででよい。

### 【課題 2-4 光を受けた太陽電池の起電力と電流】

太陽電池は光エネルギーを電気エネルギーに変換するデバイスである。そこで、青色 LED の光を太陽電池に照射し、太陽電池の起電力と太陽電池から取り出される電流を測定しよう。課題 2-2 と同様に、「図 2-4 の回路」を用いて青色 LED が放射した光を太陽電池で受け、図 2-10(a)と図 2-10(b)の回路で測定すればよい。まず、太陽電池のリード線をブレッドボードから外し、代わりに青色 LED を順方向に電圧が加わるようにつなぎなさい。次に、青色 LED の光を太陽電池で効率よく受けるために、図 2-11 のように、太陽電池をブレッドボードの中央の溝に立て（太陽電池の電極の部分ブレッドボードの外側に出すと邪魔にならない）、青色 LED の頭部を太陽電池の受光面におおよそ垂直にして接近させなさい。太陽電池をゆるく固定するために、輪ゴムを用いなさい。太陽電池の 2 本のリード線をそれぞれブレッドボードの二つの穴（たとえば H45 と H47）に差し込みなさい。太陽電池の起電力と電流の測定にはマルチメータ 2 を用いなさい。マルチメータ 2 の 2 本の測定プローブにつないだジャンパー線のピンを、それぞれ太陽電池とつながるようにブレッドボードの二つの穴（たとえば J45 と J47）に差し込みなさい。一方、100 Ω の抵抗の両端に接続したマルチメータ 1 はそのまま用いなさい。

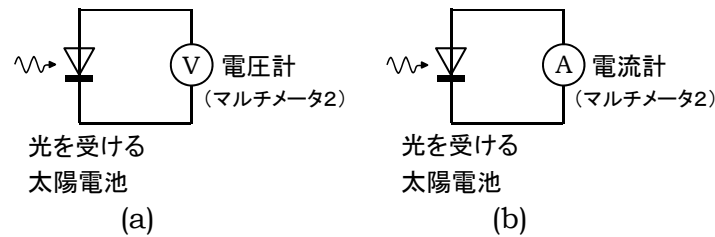
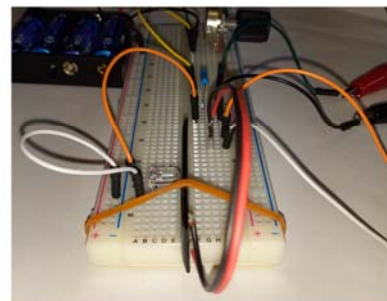
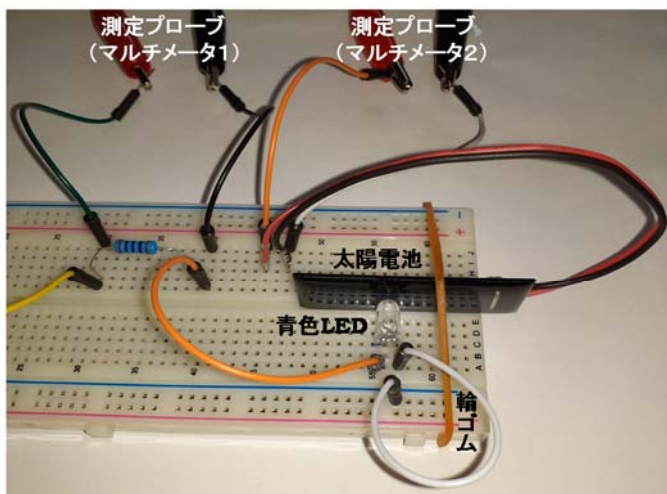


図2-10 光を受ける太陽電池の(a)起電力測定用と (b)電流測定用の回路図。



左図を右から見た図。

図2-11 発光用の青色LEDと太陽電池。



#### 問 2-4a

太陽電池のリード線につないだマルチメータ 2 の赤色の測定プローブが電圧測定用入力ジャックに深く差し込まれていることを確認し、マルチメータ 1 も 2 も「直流 V」モードにして、最小電圧 0.01 V まで測定できるレンジを選択しなさい。そして、青色 LED に最大の電流  $I_{\max,B}$  を流し、放射された青色の光を太陽電池で受けて、太陽電池の起電力  $V_{B \rightarrow S}$  を測定し、測定値を  $I_{\max,B}$  の値とともに解答用紙に記録しなさい。起電力は 0.1 V の桁まで、 $I_{\max,B}$  は 1 mA の桁まで記録すればよい。

なお、太陽電池の起電力と太陽電池から取り出される電流は青色 LED の頭部と太陽電池の位置と向きによって変化するので、測定前に大きくなるように調整し、問 2-4a と問 2-4b の測定中には調整しないこと。

マルチメータの値が大きく変動して安定しない場合は、ジャンパー線や可変抵抗の接触不良によることがあるので、何度か抜き差ししてみなさい。可変抵抗はしっかりと押し込んでみなさい。それでも改善しない場合は、番号札を使って監督者に知らせなさい。

#### 問 2-4b

太陽電池のリード線につながったマルチメータ 2 の赤色の測定プローブを電圧測定用入力ジャックから電流「 $\mu\text{A}/\text{mA}$ 」測定用入力ジャックに差し替え、「電流 mA」モード（内部抵抗は十分に小さい）にして、最小電流 0.01 mA まで測定できるレンジを選択しなさい。表示が「AC」になっている場合は、「選択 (SELECT)」ボタンを押して「DC」にしなさい。マルチメータ 1 は「直流 V」モードのままにして、最小電圧 0.01 V まで測定できるレンジを選択しなさい。そして、青色 LED に流れた電流と太陽電池から取り出された電流の関係を、青色 LED に流れる電流がゼロから最大の電流  $I_{\max,B}$  までの間で両端を含む 5 点程度測定し、測定値を解答用紙に記録しなさい。測定点の場所は、太陽電池に流れる電流の振る舞いがわかるように適切に選びなさい。次に、解答用紙の方眼紙を使って、測定値を横軸が青色 LED に流れた電流、縦軸が太陽電池から取り出された電流のグラフにプロットしなさい。

「電流 mA」モードで測定できない場合は、マルチメータ内のヒューズが切れている可能性があるため、番号札を使って監督者に知らせなさい。また、マルチメータの値が大きく変動して安定しない場合は、ジャンパー線や可変抵抗の接触不良によることがあるので、何度か抜き差ししてみなさい。可変抵抗はしっかりと押し込んでみなさい。それでも改善しない場合は、番号札を使って監督者に知らせなさい。

問 2-4b で課題 2 における測定は終了する。測定終了後は、電池ボックスの乾電池を 1 個抜き、回路に流れる電流を **OFF** にしなさい。

### 問 2-4c

問 2-4b で得られた、青色 LED に流れた電流と太陽電池から取り出された電流は、おおよそどのような関係か、答えなさい。また、このような関係になった理由を簡潔に説明しなさい。

### 問 2-4d

問 2-4b で描いたグラフから、電流-電流の伝達効率 ( $= \frac{\text{太陽電池から取り出された電流}}{\text{青色 LED に流した電流}}$ ) を求めなさい。

### 問 2-4e

青色 LED に最大の電流を流したとき、太陽電池に抵抗をつないでなるべく大きな電力を取り出したいが、限界がある。問 2-4a と問 2-4b の実験結果をみると、明らかに超えられない電力値があることがわかる。その値を理由とともに答えなさい。

### 問 2-4f

青色 LED に最大の電流を流したとき、問 2-4e で答えた電力値を太陽電池から取り出すことができる電力の最大値と見なし、電力の伝達効率の最大値 ( $= \frac{\text{最大電流時の青色 LED の光を受けた太陽電池から取り出せる電力の最大値}}{\text{最大電流時の青色 LED で消費した電力}}$ ) を求めなさい。

### 問 2-4g

図 2-12 は、地上で観測された太陽光のスペクトル（単位波長幅あたりの太陽光のエネルギーの波長依存性）の一例である。本課題で取り上げた赤色 LED、青色 LED、太陽電池は、それぞれ異なる半導体物質で作られている。それぞれの物質を使って、同じ形状、同じ面積の「太陽電池」を作り、「太陽電池」としての性能を比較した場合、本課題で取り上げた太陽電池の物質が赤色 LED や青色 LED の物質に比べて優れている点および劣っている点を、エネルギーギャップの大きさと太陽光のスペクトルを考慮して答えなさい。

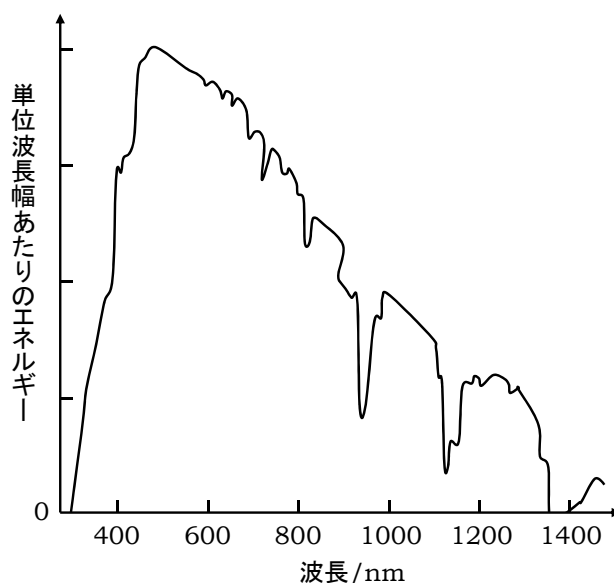


図2-12 地上で観測された太陽光のスペクトル。

