

物理チャレンジ2021

第2チャレンジ実験問題

2021年8月18日(水)

13:00~18:00

【注意書き】

1. オンライン実験試験では、解答者本人を Zoom でモニターし、記録します。
2. 解答中に、他の人の助言を受けたり、通信機器を用いて検索するなどの行為は禁止します。このような不正行為が発覚した場合、物理チャレンジ参加の資格と権利を失います。
3. 問題用紙は表紙を含めて12ページです。
4. 解答用紙は片面19枚です。
5. 筆記用具、定規ほか、指定されたもの以外は机の上に置けませんので、片づけてください。参考図書等の閲覧は禁止です。
6. 実験は以下の手続きで行ってください。
第2チャレンジオンライン試験システムホームより、**実験問題を開始する** ボタンをクリックしてください。
実験画面に入ったら、**実験課題「番号」** ボタンをクリックして、実験を開始してください。実験課題は3題あります。
遡って確認する目的で、実験結果の画像は PC に保存してもよい。ただし、試験時間中にこれをプリンターで印刷することは禁止とする。試験問題の印刷後実験試験が終了するまではプリンターを使ってはいけません。
7. 全ての解答は、解答用紙に記入してください。解答用紙の全てのページにチャレンジ番号と氏名を記入してください。
8. 解答用紙はスキャナー等で PDF ファイルにして送信するため、解答は、はっきりと濃く書いてください。また、消しゴム等を使うときは、文字等が残らないようにきちんと消してください。解答がはっきりしない場合は採点されないことがあります。
9. 解答が終わったら、全てのページにチャレンジ番号と氏名が記入されているか確認の上、解答用紙をスキャナー等で PDF ファイルにして送信してください。送信後、送信ファイルをダウンロードして、確実に送信されているか確認してください。
10. 16:20 から終了希望者は、監督者に終了意思を示して、終了処理をしてください。

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（SI）推奨の記法に従い、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。この時、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、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 mA 単位で表したい場合には、見出し欄や座標軸に I/mA と書けばよい。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。

実験課題 I

液体の比熱の測定

ある液体の比熱（比熱容量）を測定する実験を行う。比熱とは、1 g の液体の温度を 1 °C だけ上げるのに必要な熱量（エネルギー）であり、単位は、 $\text{JK}^{-1}\text{g}^{-1}$ である。

図 1 のように、容器の中に試料となる液体を適量入れる。そのなかに電熱線を浸し、電熱線に電源をつないで直流電流を流して加熱する。電熱線に流れた電流は電流計で、電熱線の両端の電圧は電圧計で測定でき、それらの値から 1 秒間に電熱線が発生する熱量 W_{in} （電熱線の電力）を知ることができる。液体の温度

は温度計で測定できる。加熱中、ときどき攪拌棒を上下させて液体をかき混ぜて均一に加熱する。

電熱線から発生した熱は、試料となる液体を温めるだけでなく、容器や攪拌棒や温度計も温める。また、容器から外に逃げる熱がある。この 2 点に注意しながら、液体の比熱を正確に求めたい。ただし、液体の蒸発はないものとする。

容器の外の気温を $T_0 (= 20\text{ }^\circ\text{C})$ とする。電熱線による加熱を始める前では、液体と容器の温度は T_0 に等しいとする。電熱線による加熱を開始してから t 秒後の液体の温度を $T(t)$ と書く。また、容器や攪拌棒の温度は常に液体の温度と等しいとする。

1 秒間に容器の外に逃げる熱量 W_{out} は、液体の温度が高くなるほど大きい。つまり、比例係数 α を用いて

$$W_{\text{out}}(t) = \alpha \cdot (T(t) - T_0) \quad (1)$$

と書けるとする。この α の値は、液体の量や温度に依存せず一定値としてよい。

液体の比熱を c 、液体の質量を M とする。また、容器や攪拌棒や温度計など液体以外の熱容量をまとめて B とする。

加熱開始から t 秒後と $(t + \Delta t)$ 秒後の間に液体の温度が $\Delta T(t)$ だけ上がったとすると、

$$\Delta T(t) = T(t + \Delta t) - T(t)$$

この Δt 秒間に電熱線から発生した熱量と外に逃げた熱量、そして温度変化の関係は

$$\{W_{\text{in}} - W_{\text{out}}(t)\} \cdot \Delta t = (c \cdot M + B) \cdot \Delta T(t) \quad (2)$$

と書ける。これらの関係式を用いて、以下の問いに答えよ。

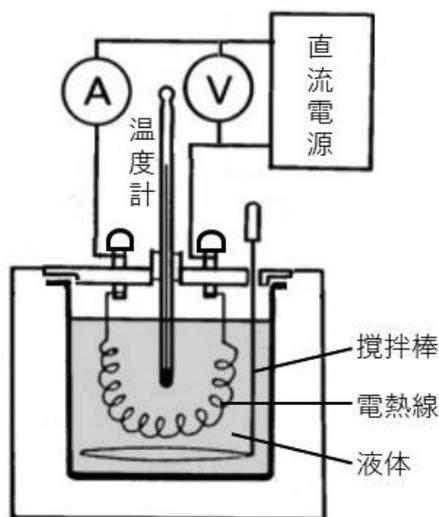


図 1：液体の比熱を測定する実験装置の模式図

実験におけるパラメータと、その範囲および刻み幅は、

- ① 液体の質量 M (50~240 g の間, 1 g 刻み)
- ② 電熱線の電力 W_{in} (1~10 W の間, 1 W 刻み)
- ③ 測定時刻 (加熱開始後の経過時間) t (0~12,000 秒の間, 1 秒刻み)

であり、実行ボタンを押すと、測定時刻 t での液体の温度 $T(t)$ が表示される。パラメータの値を変えて何度でも測定できる。測定時刻 t は、時間経過とは無関係に任意の値を入力することができる。

問 I-1

長時間加熱すると、液体の温度は上昇してやがて一定値になる。電熱線の異なる電力 W_{in} で長時間加熱して、その過程での温度変化を測定する。液体の質量を $M=100$ g と固定し、まず電熱線の電力を $W_{in}=5$ W とし、 $t=0\sim 12,000$ 秒の間の適当な時刻ごとに温度を測定しなさい。次に、 W_{in} の 2 つ以上の異なる値で同様に測定しなさい。それら 3 回以上の測定データを $T(t)$ 対 t のグラフとして、同じグラフ用紙に描きなさい。

問 I-2

問 I-1 の結果から、(1) 式の比例係数 α の値を求めよ。そのために、どのような解析をしたか説明せよ。必要ならグラフを描いてもよい。

問 I-3

今度は、加熱開始後の短時間での温度変化に着目する。異なる質量の試料液体を一定電力で加熱して、その温度変化を測定する。電熱線の電力を $W_{in}=10$ W と固定し、まず液体の質量 $M=100$ g とし、適当な時刻ごとに温度を測定しなさい。次に、 M の 2 つ以上の異なる値で同様に測定しなさい。それら 3 回以上の測定データを $T(t)$ 対 t のグラフとして、同じグラフ用紙に描きなさい。

問 I-4

問 I-3 の結果から、容器・攪拌棒・温度計などの熱容量 B と試料液体の比熱 c を求める方法を述べよ。

問 I-5

問 I-4 の方法に従って、 B と c の値を求めよ。必要ならグラフを描いてよい。

問 I-6

比熱 c の測定で、(1) 式の W_{out} の影響がどれだけあるか考察しなさい。

実験課題 II

光電効果によるプランク定数の測定

真空中において金属（ターゲット）に可視光を照射すると電子が放出される。この現象を光電効果、放出された電子を光電子と呼ぶ。金属中には伝導電子が多数あり、自由に運動している。図1に示すように、この伝導電子のエネルギー状態には幅があり（伝導帯と呼ぶ）、これらの電子は金属と真空の間にあるエネルギー障壁によって、外部にはほとんど放出されない。このエネルギー障壁を仕事関数 Φ と呼んでいる。ここに光を照射すると、光のエネルギーを吸収して真空中に放出される光電子は、金属内で持っていた負のエネルギーに光のエネルギーを加えた（正の）運動エネルギーを持つことになる。この時、放出される光電子の最大のエネルギー E は

$$E = h\nu - \Phi$$

で与えられる。ここで、 h はプランク定数、 ν は光の振動数、 Φ は仕事関数である。仕事関数は、固体内の電子が、真空状態に放出されるために必要な最低限のエネルギーである。真空中に放出される光電子のエネルギーは、（伝導帯の底が十分深ければ）0から $h\nu - \Phi$ の間にあることになる。したがって、光の振動数を変化させて、放出される光電子の最大エネルギーを測定すれば、この式からプランク定数 h を決定することが出来る。

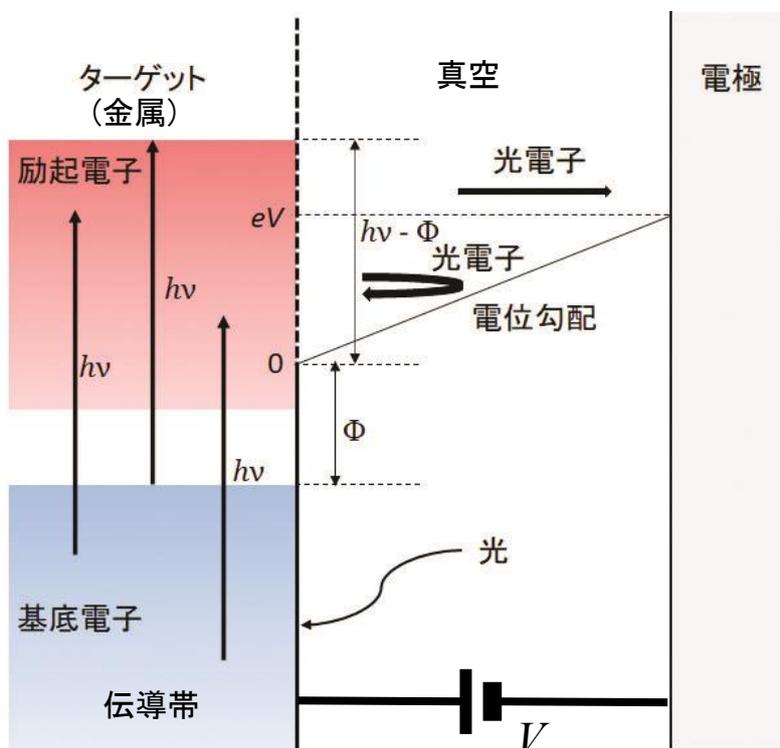


図1：ターゲット（金属）、真空、測定電極での電子のエネルギー

光電子の最大エネルギーを測定するには、図 1 のように、ターゲットと対向する測定電極の間に光電子を追い返すために負の電圧（その絶対値を**印加電圧** V と呼ぶ）をかけ、光電子が全く届かなくなる最小の電圧，すなわち，

$$eV_m = hv - \phi$$

となる電圧 V_m を決定することで得られる。このときの印加電圧 V_m を**阻止電圧** という。ここで e は素電荷である。

素電荷 e と電位差 V の積は、電位差 V で加速された電子の運動エネルギーを表し、エネルギーの単位として電子ボルトが使われることがある。1 電子ボルト（記号 eV ）は、 $1 eV = 1.6 \times 10^{-19} J$ である。

本実験では、図 2 のように、ターゲット金属に可視光を照射し、放出された光電子のうち、電極に到達した電子による電流を、印加電圧に対して測定することにより、プランク定数を求める。

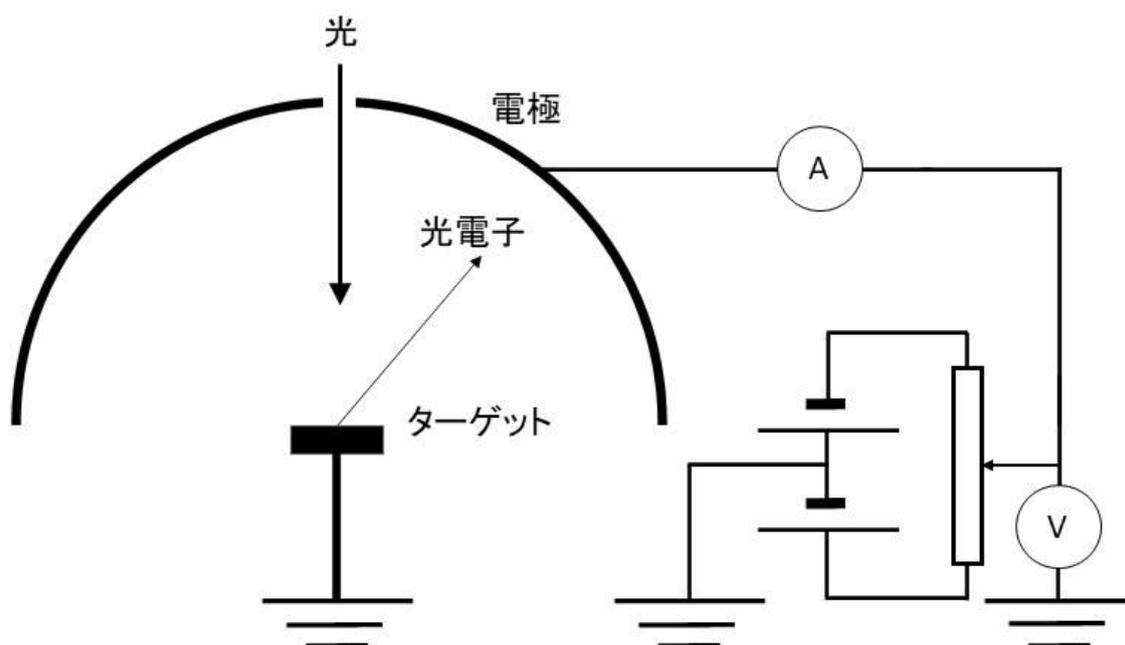


図 2：測定装置の模式図

図 2 では、高校教科書に掲載されている光電管の電極配置と異なり、阻止電圧を精度良く測定するための配置となっている。ターゲットと電極は同じ金属材料で出来ている。ターゲットは接地されている。光をターゲットに照射すると光電子が放出され、電極に到達する。その際、電源を含む回路にはターゲットから放出される光電子による電流が流れ、その大きさを電流計で測定できる。

放出される光電子の最大運動エネルギーは、上の実験装置によって、電極にかける負の電位（印加電圧）を変化させ、電流計を流れる電流がゼロになるときの値，すなわち、阻止電圧を求めることで得られる。このときの放出時の光電子の最大運動エネルギーは阻止

電圧 V_m に素電荷 e を掛けることで得られる。すなわち

$$E = eV_m$$

である。

実験に用いられる光は可視光とする。その波長 λ は 380 nm から 800 nm の範囲である。

波長と振動数の関係は

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

である。ここで c は光速、 λ は光の波長である。光速は 3.0×10^8 m/s とする。

この実験では、入力データとして、波長 λ と電圧 V を入力することで、電流計に流れる電流値 I を得ることが出来る。電圧は 1 mV (0.001 V) の間隔で変化させることが出来るとする。

問 II-1

光の波長 λ を決め、印加電圧 V を変化させて、出力の電流値 I を測定し、電流値 I を電圧 V に対してプロットし、電流値がゼロになる電圧 V_m を求めなさい。さらに3つ以上の異なる波長 λ の光で同様の測定を行い、電流値がゼロとなる電圧 V_m を求めなさい。

問 II-2

印加電圧に対する電流値の変化がなだらかな曲線となることについて、なぜそのように変化するのか定性的に説明しなさい。

問 II-3

問 II-1 の実験で、それぞれの光の波長 λ で電流値がゼロになるときの阻止電圧 V_m を光の振動数 ν に対してプロットしなさい。

問 II-4

問 II-3 のプロットを直線で近似し、その勾配を求めなさい。

問 II-5

問 II-3 で求めた勾配から、プランク定数を求めなさい。

問 II-6

問 II-3 のプロットで、直線はグラフの原点を通らない。振動数ゼロにおける切片から仕事関数の値を電子ボルトの単位で求めなさい。

実験課題 III

電気ブラックボックス

【ダイオードの特性】

ダイオードは電気回路で使われる電子素子の一つである。電流で光を発する LED(発光ダイオード)もその名の通りダイオードの一種だが、ダイオードの最も基本的な性質は整流作用を持つことにある。ここで整流作用とは、電流の方向によってその流れやすさに差を生じさせる働きのことである。例えば、抵抗を流れる電流は抵抗の両端間の電圧に比例し、電圧の符号を変えた場合には逆方向に同じ大きさの電流が流れるのに対し、ダイオードを流れる電流の大きさは加えた電圧に比例せず、しかも電圧の極性(正負)によって大きく異なる。

高等学校の物理でダイオードは一方方向の電流しか流さない素子として扱われる。つまり、順電圧を加えた場合、電流が流れ、ダイオードは低い抵抗を持つ抵抗体のように扱うことができるのに対し、逆の極性の電圧を加えた場合には電流は流れず、ダイオードはあたかも絶縁体のようにふるまう。このようなダイオードを理想ダイオードとよぶ。現実のダイオードは理想ダイオードとよく似た特性を持つものの、詳しく見ると異なるところも多い。

あるダイオード D に可変直流電源、 $100\ \Omega$ 抵抗、電流計をつなぎ、図1の回路を作った。この回路で直流電源電圧 E を変えて電流値 I を測定した結果を表 1 に示す。

問 III-1 一般に電気素子を流れる電流を素子に加えた電圧に対してプロットしたグラフを素子の電流・電圧特性グラフという。表 1 の結果を使って、解答用紙の表にダイオードを流れる電流とダイオードに加わる電圧をまとめ、グラフ用紙にダイオード D の電流・電圧特性グラフを描きなさい。

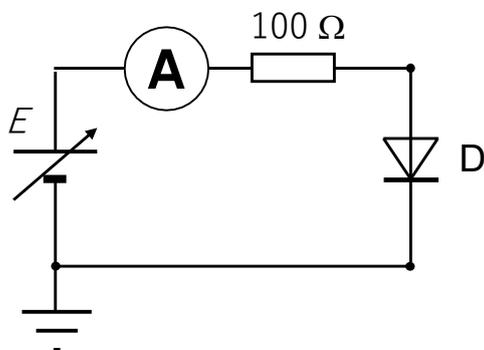


図 1 : ダイオードの特性測定回路

表 1:測定結果

E / V	I / A
-9.000	-5.91×10^{-9}
-8.000	-5.73×10^{-9}
-7.000	-5.56×10^{-9}
-6.000	-5.39×10^{-9}
-5.000	-5.22×10^{-9}
-4.000	-5.04×10^{-9}
-3.000	-4.87×10^{-9}
-2.000	-4.70×10^{-9}
-1.000	-4.52×10^{-9}
0	0
0.500	9.69×10^{-5}
1.000	0.00334
2.000	0.01263
3.000	0.02229
4.000	0.03205
5.000	0.04185
6.000	0.05169
7.000	0.06154
8.000	0.07140
9.000	0.08127
10.000	0.09115

【ブラックボックス】

A, B, C, D, E, F とラベル付けされた6つの端子を持つ箱(ブラックボックス)があり, その内部には, 図2(右)のように結線された電気抵抗 R_1 および R_2 ($R_1 < R_2$ とする)の2つの抵抗 R_1 および R_2 , 静電容量 C_1 および C_2 ($C_1 < C_2$ とする)の2つのコンデンサー C_1 および C_2 と, 前問で調べたダイオードと同じ特性を持つダイオード D が1つ入っている。ただし, 回路の端子 1~6 と箱の端子 A~F の対応関係は不明である。

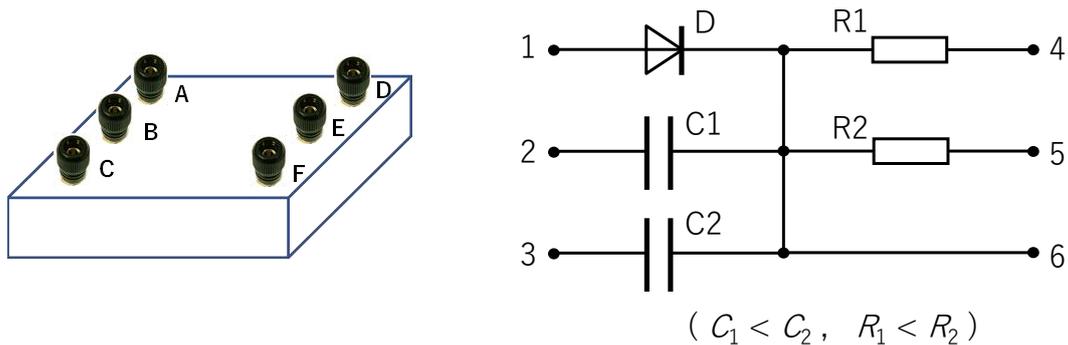


図 2 : ブラックボックス : (左) 外観 と (右) 内部回路

問 III-2 次の測定装置を使って, 端子 1~6 と端子 A~F の対応関係を決めなさい。解答用紙には, 結論とともにその根拠となる測定結果を記しなさい。

抵抗とコンデンサーからなる回路については, 次ページにある【C と R の回路】の解説を参考にしなさい。

使用できる測定器: 図3の直流電源。10 V の起電力を持つ電池, 電流計, 100 Ω の抵抗とスイッチを内蔵している。S と G の出力端子を持ち, G 端子は接地されている。測定開始から 1 秒後にスイッチが電圧源側に切り替わり, それ以後 1.5 秒間の電流変化が記録されグラフとして表示される。

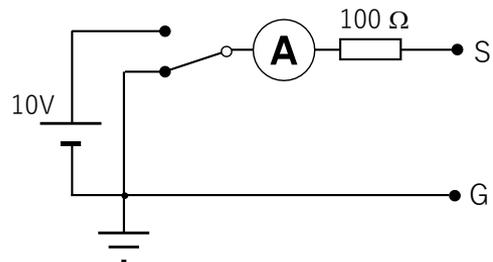


図 3 : 電流計付き 10 V 直流電源

実験方法 :

- ① 実験問題システムの「実験課題 III-A」に移動する。
 - ② S と G をつなぐ端子を A~F の中から選び, 入力ボックスに入力する。
 - ③ 実行ボタンをクリックすると電流変化のグラフが出力される。
- ※ 電流値が小さい場合には, 縦軸上部に 10^{-8} のように乗数が表示される。見過ごさないように注意すること
- ※ 拡大ボタンを押すとグラフの拡大縮小ができる。画面に定規をあてて測ってもよい。
- ※ 端子配置を変えた複数のグラフを比較するために, グラフの概形と特徴的な数値を計算用紙

にメモすること。なお、グラフ画像上でマウスを右クリックすると、「新しいタブで画像を開く」、「名前を付けて画像を保存...」、「画像をコピー」の選択ができる。「新しいタブで画像を開く」にすれば別のタブ上にコピーされ、タブを閉じるまで随時参照できる。画像をプリンターで印刷することも可能であろうが、今回の実験課題チャレンジでは、これは禁止とする。試験問題の印刷後実験試験が終了するまではプリンターを使ってはいけない。

問 III-3 問 III-2 の実験を続け、ブラックボックス内部の2つの抵抗 R_1 および R_2 の電気抵抗 R_1 および R_2 ($R_1 < R_2$)、2つのコンデンサー C_1 および C_2 の静電容量 C_1 および C_2 ($C_1 < C_2$)の値を推定しなさい。

必要なら、以下の解説を参考にしなさい。

【CとRの回路】

電気抵抗 R の抵抗器 R 、静電容量 C のコンデンサー C 、起電力 V_0 の電池とスイッチからなる図4のような回路において、十分長時間 off 側にあったスイッチを時刻 0 に on 側に倒した後の端子(b)を基準とした端子(a)の電位 $V_{on}(t)$ および、十分長時間 on 側にあったスイッチを時刻 0 に off 側に倒した後の端子(b)を基準とした端子(a)の電位 $V_{off}(t)$ は、次式および図5のように表される。

$$V_{out} = V_0(1 - 2^{-\gamma t}) \quad (1)$$

$$V_{out} = V_0 \cdot 2^{-\gamma t} \quad (2)$$

ここで、時間の逆数の次元を持つパラメータ γ (ギリシャ文字, ガンマと読む)は次のように表される。

$$\gamma = 1/(\log_e 2 CR) = 1.4427/CR \quad (3)$$

\log_e は自然対数と呼ばれ、電卓では \ln と表記されることもある。なお、SI 単位系の単位であるファラッド(F)とオーム(Ω)の積は、 $F \Omega = s$ (秒)である。

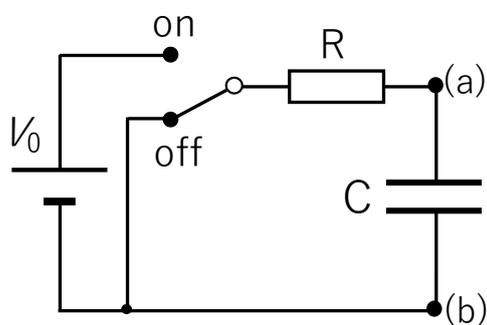


図4 : CR 回路

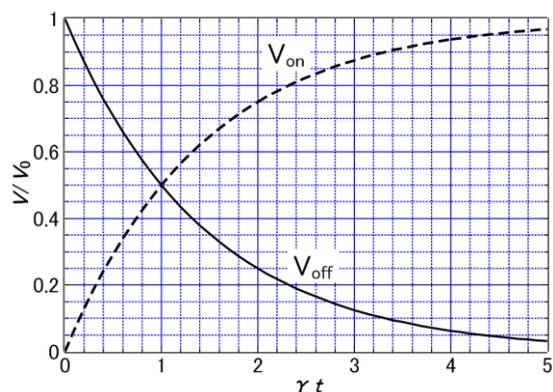


図5 : コンデンサーの両端の電圧変化

【ダイオード回路 1】

次の実験では図 6 の交流電源とオシロスコープを使う。交流電源は周波数 100 Hz, 振幅 10 V の正弦波電圧を発生し, オシロスコープは入力電圧 (V) の時間 (t) 変化を $V-t$ グラフとして記録し表示する。交流電源は S と G の出力端子を, オシロスコープは P と G の入力端子をそれぞれ持つ。両者の G 端子は接地されているので, 電気的につながっていることになる。

問 III-4 ブラックボックス内のダイオード D と抵抗 R1 および交流電源を用いて図 7 の回路を作り, 接地されている端子 (b) を基準とした端子 (a) の電位 $V_a(t)$ および端子 (c) の電位 $V_c(t)$ をオシロスコープで観察し, その波形の概形を描きなさい。 $V_a(t)$ と $V_c(t)$ の波形は, 対応関係がわかるように注意しながら, 一枚のグラフ上に二つの曲線として描きなさい。

実験方法 :

- ① 実験問題システムの「実験課題 III-B」に移動する。
 - ② 図7の回路になるように交流電源の S 端子と G 端子をつなぐ端子 (A~F) を指定する。
 - ③ オシロスコープの P 端子をつなぐ端子 (A~F) を指定する。
 - ④ 実行ボタンをクリックすると, オシロスコープ波形が出力される。
- ※ 電圧値が小さい場合には, 縦軸上部に 10^{-8} のように乗数が表示される。見過ごさないように注意すること。拡大ボタンを押すとグラフの拡大縮小ができる。画面に定規をあてて測ってもよい。

問 III-5 問 III-4 の $V_a(t)$ と $V_c(t)$ のピーク電圧の差を求め, その原因を説明しなさい。

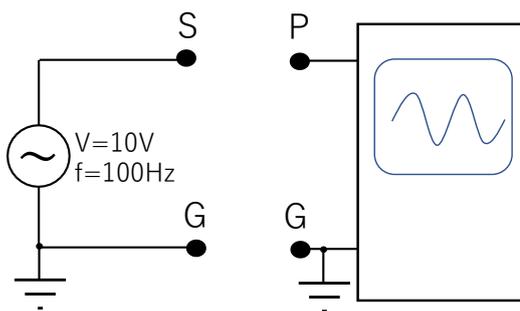


図 6 : 交流電源(左)とオシロスコープ(右)

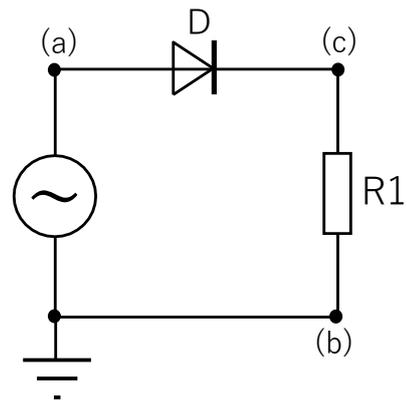


図 7 : 問 III-4 の回路

【ダイオード回路 2】

問 III-6 ブラックボックス内のダイオード D と抵抗 R1 または R2, コンデンサー C1 または C2 , 交流電源を用いて図 8 の回路を作り, 抵抗とコンデンサーの4つの組み合わせのそれぞれについて

て、接地されている端子(b)を基準とした端子(c)の電位 $V_c(t)$ をオシロスコープで観察し、その波形を描きなさい。S, P, G 端子をつないだ端子記号(A~F)も記入すること。

実験方法：

- ① 実験問題システムの「実験課題 III-C」に移動する。
 - ② 図8の回路になるように交流電源のS端子とG端子をつなぐ端子(A~F)を指定する。ただし、G端子にはA~Fの中から最大2つの端子を指定することができる。
 - ③ オシロスコープのP端子をつなぐ端子(A~F)を指定する。
 - ④ 実行ボタンをクリックすると、オシロスコープ波形が出力される。
- ※ 電圧値が小さい場合には、縦軸上部に 10^{-8} のように乗数が表示される。見過ごさないように注意すること。拡大ボタンを押すとグラフの拡大縮小ができる。画面に定規をあてて測ってもよい。

問 III-7 問 III-6 の(c)の電位の波形が問 III-4 の(c)の波形とは異なる理由を説明しなさい。

問 III-8 図 9 のように直流電圧が周期的にわずかに変動するとき、この変動をリップルという。図 9 を参考にして問 III-6 で観察した 4 組の電圧波形 $V_c(t)$ について、最大値 V_{\max} 、最小値 V_{\min} 、平均値 $V_{\text{av}} = (V_{\max} + V_{\min})/2$ 、リップル電圧 $V_{\text{rp}} = (V_{\max} - V_{\min})/2$ 、リップル率 $r = V_{\text{rp}} / V_{\text{av}}$ を求めなさい。必要なら、次の問 III-9 の解答で参照できるように、問 III-3 で推定した電気抵抗および静電容量の値を転記しなさい。

問 III-9 抵抗と静電容量の値によってリップル率は変わる。交流電源から直流電源を作るにはリップル率をできるだけ小さくしたい。リップル率が小さくなるのはどのような場合かを書きなさい。また、リップル率が小さくなる理由を説明しなさい。数値的な検討までは必要ない。

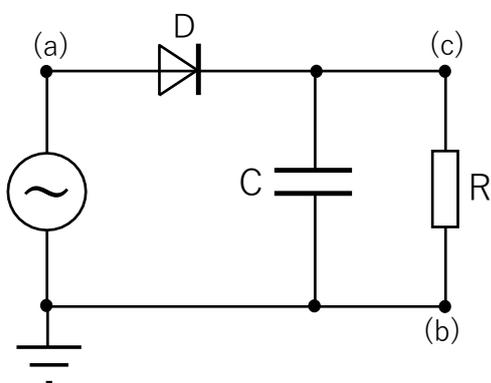


図 8 : 問 III-6 の回路

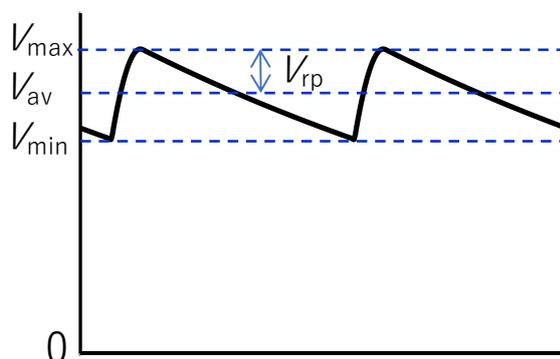


図 9 : リップル