

物理チャレンジ 2013
実験問題
2013 年 8 月 7 日 (水)

諸注意・実験器具確認	8 : 30	～	8 : 40
実験問題にチャレンジ	8 : 40	～	13 : 20
実験器具後片付け	13 : 20	～	13 : 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、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せよ。
3. チャレンジ開始後、次ページ以降に記載の<実験で使用する部品>を読み、すべての部品を確認した後、課題に取り組むこと。
4. 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場所に記入すること。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。
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。ただし、電卓は自分の物を使用してもよい。
6. 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、手をあげ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。
7. チャレンジ開始後から 12 : 00 まではチャレンジを終了することはできない。
8. チャレンジ時間中に気分が悪くなったときやトイレに行きたくなったとき、あるいは質問があるとき、チャレンジを終了するときには、手をあげて監督者に知らせること。
9. 終了の合図があれば、解答用紙を机の右側におく。その後、実験器具をもと通りに箱に入れること。また、机上に貼られたチャレンジ番号と氏名が書かれた紙をはがし、箱に入れること。問題冊子と下書き用紙は持ち帰ってよい。

<実験で使用する部品>

まず、机の上に電源装置が置かれていることを確認し、次に箱を開けて箱の中の部品を机の上に並べ、以下の部品があることを確認する。

(1) デジタルマルチメーター	1 個
(2) ストップウォッチ	1 個
(3) デジタル温度計	2 個
(4) 放射温度計	1 個
(5) はんだごて (こて先のかわりに銅製の棒がつけられている)	1 個
(6) 銅製容器(ふた付)	1 個
(7) 発泡スチロール容器(大)	3 個
(8) 発泡スチロール容器(小)	5 個
(9) バット(浅い箱形のプラスチック製容器)	1 個
(10) ドライバー(3 本組)	1 組
(11) ラジオペンチ	1 個
(12) 30 cm 定規(溝付き)	1 個
(13) スポンジ	1 個
(14) 手袋(軍手)	1 組
(15) タオル	1 枚
(16) ドラフティングテープ	1 巻
(17) スポイト	1 個
(18) 氷スコップ	1 個
(19) ビニール袋 1 : 内容は以下の通り	
(19-1) 32 cm の金属棒 (銅, 真鍮 ^{しんちゆう} , アルミニウム各 1 本)	3 本
(19-2) 8 cm の金属棒 (銅, 真鍮 ^{しんちゆう} , アルミニウム各 1 本)	3 本
(19-3) 銅ブロック	1 個
(注 : 銅は赤褐色, 真鍮は黄色, アルミニウムは白色)	
(20) ビニール袋 2 : 内容は以下の通り	
(20-1) マグネット付きクリップ	1 個
(20-2) ミノムシクリップコード	3 本
(20-3) ねじとナット (1 組は予備)	2 組
(20-4) マドラー(氷水をかき混ぜる)	1 本

<実験問題の背景> 熱の伝わり方

熱の伝わり方には伝導、対流、放射の3種類が知られている。この実験問題では、これらの伝わり方のうち、金属における熱伝導、および放射について問う。

金属は熱伝導によって熱をよく伝えるとともに、電気もまたよく伝える。課題1では、金属の熱伝導度と電気伝導度の間にはどのような関係があるのかについて調べる。

放射は電磁波によって熱が伝えられる現象である。課題2では物体の温度と放射されるエネルギーとの間にはどのような関係があるのかについて調べる。

<課題1> 電気伝導度と熱伝導度

図1-1に示すように一定の断面積 S [m²] をもち、長さ L [m] の金属棒を考える。この棒に定常的な（時間変化しない）電流が流れているとすると、オームの法則によれば、両端に加えた電位差（電圧） $V = V_1 - V_2$ [V] と任意の断面を通過する電流（単位時間に流れる電気量） I [A = C/s] は比例し、その比例係数が電気抵抗 R [Ω] である。

$$V = V_1 - V_2 = RI \quad (1)$$

同じ電気抵抗を持つ金属棒を直列接続した場合の合成抵抗が本数倍になることや、並列接続した場合の合成抵抗が本数分の一になることから、金属棒の電気抵抗は断面積に反比例し、長さに比例することがわかる。これを

$$R = \frac{\rho L}{S} = \frac{L}{\sigma S} \quad (2)$$

と書き表したときの比例係数 ρ [Ω·m] を抵抗率（比抵抗）という。その逆数である電気伝導度 σ は、この金属材料における電気の伝わりやすさを表す。式(1)、(2)から、図1-1の場合、電気伝導度は、

$$\sigma = \frac{IL}{S(V_1 - V_2)} \quad (3)$$

で与えられる。電気伝導度の単位は、 $1/(\Omega \cdot m)$ となる。

一方、熱の伝わり易さは熱伝導度 K で表される。同じ金属棒の任意の断面を通過する熱流（単位時間に流れる熱量） Q [W = J/s] は、両端の温度差 $T_1 - T_2$ [K] に比例す

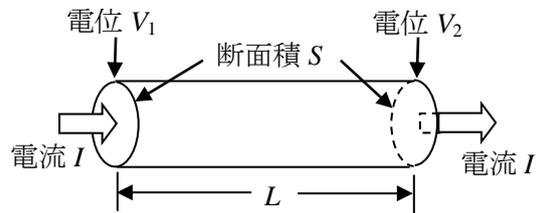


図1-1

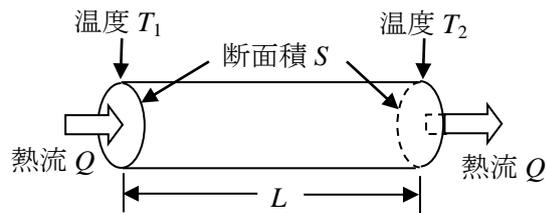


図1-2

るので、電気伝導の場合の電流 I を熱流 Q で、電位差 $V_1 - V_2$ を温度差 $T_1 - T_2$ で置き換えればよい。図 1-2 の場合、熱伝導度は

$$K = \frac{QL}{S(T_1 - T_2)} \quad (4)$$

で与えられる。熱伝導度の単位は $W/(m \cdot K)$ となる。

これらの関係式は電気や熱の流れが時間によって変わらない定常状態において成り立つ。また、電気や熱は、棒の長さ方向にのみ流れ、側面を通過して流出・流入してはならない。さもないと、断面を通過する電流や熱流は断面ごとに異なることになってしまう。

熱伝導度の大きい物質は、同時に電気伝導度が大きい。この原因は何だろうか。電子が電荷とともにエネルギーも運んでいるからであろうか。もしそうであるならば、電子の動きやすさが熱伝導度と電気伝導度を決めていると推測される。この二つの伝導度の間にどのような関係が成り立つかを求めるのが〈課題 1〉の目的である。

以下に述べる部品と計測器、電源を組み合わせ、銅、真鍮（しんちゅう）、アルミニウムの 3 種類の金属について熱伝導度と電気伝導度を求める。用意されている部品、測定器具は以下の通り

部品（写真参照のこと）

- 1) 熱伝導度計測のための試料棒 3 種 全て、直径 6.0 mm、長さ 8.0 cm である。
- 2) 電気伝導度計測のための試料棒 3 種 熱伝導計測のための試料棒は太くて電気伝導度を測るのが困難なので、同じ材質で、断面積が小さく長い試料を利用する。直径は、銅 2.0 mm、真鍮 2.0 mm、アルミニウム 3.0 mm で、長さは全て 32 cm である。
- 3) 熱発生源としてのはんだごて（ただし、はんだ付け用のこて先ではなく、銅の棒が付けられている。）この銅棒の先に試料棒を取り付け高温側とする。
- 4) 試料棒の他の端を低温側として固定し温度を一定に保つための銅ブロック。
- 5) 氷、水を入れるための発泡スチロール容器(小)
- 6) 氷と水は、会場の何箇所かに置いてある保温ケースに入っているのので、各自で必要な時に取りに行くこと。



図 1-3 試料棒（上 3 本は電気伝導計測用、下 3 本は熱伝導計測用）



図 1-4 はんだごて



図 1-5 銅ブロック

測定器具（写真参照のこと）

- 1) デジタル温度計 2本 先端で温度を測る。ON/FAST スイッチを押すことで温度が表示される。温度の測定間隔は 10 秒であるが、ON/FAST スイッチを押し続けると 2 秒になる。AUT-OFF スイッチを押すと、数分後に電源が切れる。
- 2) デジタルマルチメーター 回転式のスイッチを回すことにより、電圧、電流、抵抗などを測定する。電源を入れてから約 15～30 分後に自動的に電源が切れる機能（オートパワーオフ）があるので、計測途中で電源が切れた場合には、SEL ボタンを 1 回押すと電源が再び入る。
- 3) 電源装置 電気伝導度の測定やはんだごてヒーターへ電流を供給するために用いる。電流と電圧は正面パネルにデジタル表示される。ミノムシクリップ付のケーブル 1 組(赤・黒)が付属している。電圧調整(VOLTAGE)つまみ、電流調整(CURRENT)つまみがあるので、文中の指示に従って操作すること。



図 1 - 6 デジタル温度計



図 1 - 7 デジタルマルチメーター



図 1 - 8 電源装置

課題 1 - 1 電気伝導度の測定

細長い導体棒の電気抵抗 R [Ω] と導体の長さ L [m], 断面積 S [m^2], 電気伝導度 σ [$1/(\Omega\cdot\text{m})$] とは次の関係式で結ばれている。

$$R = \frac{L}{\sigma S} \quad (2)$$

課題 1 - 1 - 1 二端子抵抗測定 :

3種類の金属試料の長さ 30 cm の区間の電気抵抗を, 以下の手順に従い, デジタルマルチメーターで測定しなさい。

数回測定し, 値が安定しないときは, 接触抵抗が影響している可能性がある。必要なら, 与えられた道具を用いて接触抵抗を小さくする工夫をしなさい。

解答欄に, 安定した結果が得られた場合はその値を, 得られなかった場合は「測定不能」と書きなさい。また, 接触抵抗を小さくする工夫をした場合はその内容を, 図を用いて説明しなさい。

手順 1. 溝付き 30 cm 定規の溝に, 金属試料のひとつを, テープで固定する。

手順 2. デジタルマルチメーターを抵抗測定位置 (Ω) に設定し, 金属試料の長さ 30 cm の区間の両端にデジタルマルチメーターの端子を接触させて, 抵抗値を測定する。

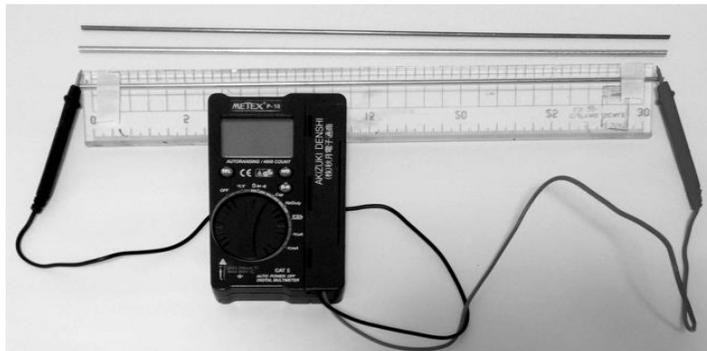
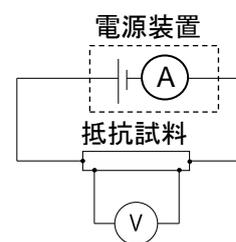


図 1 - 9 二端子抵抗測定

課題 1 - 1 - 2 四端子抵抗測定 :

金属試料の電気伝導度を正確に知るためには四端子抵抗測定をする必要がある。右の結線図および手順を参考にして, 3種類の金属試料について, 一定の電流を流した状態で 2点間の電圧 (電位差) を測定することにより, 電気抵抗および電気伝導度を求める。



結線図 直流四端子抵抗測定法

- 手順1. 二端子測定と同様に試料を定規に固定する。
- 手順2. ミノムシクリップコードを使って、結線図のように金属試料両端と電源装置端子をつなぐ（電源装置は、電圧(VOLTAGE)調整つまみ、電流(CURRENT)つまみを共に反時計回りにいっぱいの最小位置までまわしておく）。
- 手順3. 電源装置の VOLTAGE つまみを時計方向に半回転し、CURRENT つまみをゆっくり回して測定電流を設定する。
- 手順4. デジタルマルチメーターを電圧測定位置（V）に設定し、測定端子を試料の2点に接触させ電圧を読む。デジタルマルチメーターの金属端子が被測定金属に確実に接触していることを確認すること。
- 手順5. 試料を替えるときは必ず電源装置の出力電流、電圧をゼロにすること。

- (1) 各部品をどの様に組み立てたか、図を描いて示し、理由も付け加えなさい。また、特に注意した点を書きなさい。
- (2) 各試料について、0.5 A, 1.0 A, 1.5 A の3種の電流値に対し、測定端子間隔を 5 cm, 10 cm, 15 cm, 25 cm, 30 cm に選んで電圧を測定し、結果を表に示しなさい。
- (3) 各試料について、3種の電流値における、端子間隔に対する測定電圧の依存性を、金属試料ごとに1枚のグラフにまとめなさい。電流値ごとに異なる記号を用いること。
- (4) 3種類の金属試料について、試料の長さ 30 cm の区間の電気抵抗および電気伝導度の値を、結果の導き方が理解しやすいように、説明を付けて書きなさい。その際、有効数字がどこまでかを根拠とともに明示しなさい。
- (5) 各試料について、オームの法則が成り立っているといえるか。理由とともに書きなさい。

課題 1-1-3

課題 1-1-1 では得られなかった、試料による抵抗値の区別が、課題 1-1-2 で可能になった理由について書きなさい。

課題 1 - 2 熱伝導度の測定

熱伝導度 K は

$$K = \frac{QL}{S(T_1 - T_2)} \quad (4)$$

で与えられるから、 K を決定するためには、試料の金属棒の 2 点における温度 T_1, T_2 [K] とその 2 点間の距離 L [m]、棒の断面積 S [m²] および熱流 Q [W] の値が必要となる。このうち、 L, S の値は課題 1 - 2 - 1 の中で与えられる。 T_1, T_2 は 2 本のデジタル温度計で直接測定できる。

試料の棒を流れる熱流 Q は電流のように、直接測定することはできないので、その測定には工夫が必要となる。試料棒全体が室温 T_0 にあるときは、 $T_1 = T_2 = T_0, Q = 0$ と考えられる。棒の一端を氷水で冷やすと、時間の経過とともに $T_2 < T_1 < T_0$ となるであろう。一端を氷水で冷やしたまま、他端に熱源（はんだごて）を接続して、 $T_1 = T_0$ を保つように加熱したとする。このとき熱源に供給した電力（単位時間あたりの仕事）を P として、次の仮定が成り立つものとして熱流 Q を求める。

仮定 1：棒を流れる熱流は、熱源に供給される電力に等しい。すなわち、

$$Q = P \quad (5)$$

実験装置の組み立てと測定の手順

測定試料は、電気伝導度測定に使用されたものと同じ材質の棒状試料を使う。長さ 8.0 cm、直径 6.0 mm、種類は銅、真鍮、アルミニウムである。

実験では、はんだごてから熱の供給を受けている室温とほぼ等しい高温部と、氷水で冷やされている低温部との間を試料でつなぎ、生じる温度差を測定することで熱伝導率を得る。

手順 1. 測定試料を、図 1-10 を参考にして、加熱ヒーター（はんだごて）にとりつける。
ネジは、ドライバー(#1)とラジオペンチを使ってしっかりと締め付ける。

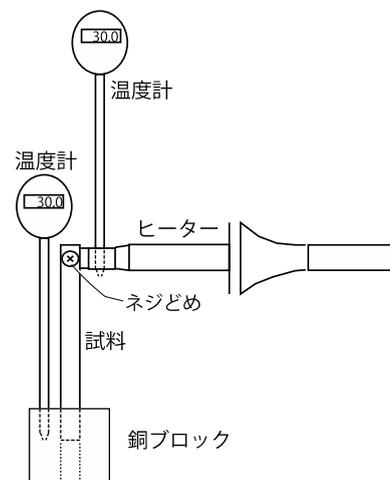


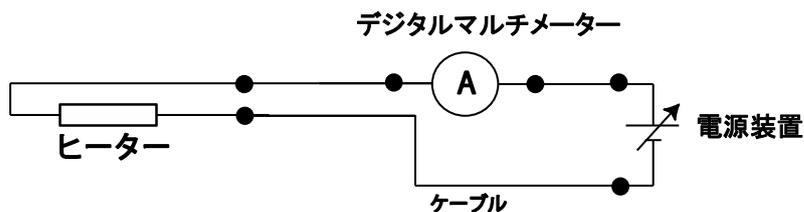
図 1 - 1 0 試料と温度計の取り付け方

以下の手順2～手順5は下の写真を参考にすること。なお、デジタル温度計の測定時間間隔は通常10秒であるが、ON/FAST ボタンを押し続けると2秒間隔となる。



図1-11 実験装置の写真

- 手順2. 試料を銅ブロックの中心の穴に挿入して落ちないようにしっかりととりつけ、スポンジの上に置いた発泡スチロール容器(小)の中に設置する。スポンジと発泡スチロール容器はあらかじめバットの中に入れておく。はんだごてはマグネット付クリップを使って電源装置の上に固定する。この状態で、ネジの締め付けをもう一度確認する。
- 手順3. 銅ブロックとはんだごてに温度計をとりつけ、試料を室温においた状態で試料の両端の温度を記録する。これを室温 T_0 とする。
- 手順4. 発泡スチロール容器(小)に氷と水を入れる。ただし、銅ブロックの上面が氷水の面より上になるように保つ。
- 手順5. 電源装置に、電流測定用として電流測定位置(mA)に設定したデジタルマルチメーターをとりつける。(電源装置の VOLTAGE, CURRENT つまみを最小にまわしておく)



注意：ミノムシクリップつきケーブルと端子を接続する時には、写真の例に従って、露出部分がないように結線すること（クリップカバーをずらす）。また実験中にはずれないように配慮すること。



よくない接続法



よい接続法

- 手順6．電源装置の **CURRENT** つまみを時計方向いっぱいまで回す。**VOLTAGE** つまみをゆっくり回してヒーターへの電圧を調整しながら、試料上部の温度計が、室温付近で安定するように設定する。試料下部の温度が上昇しないように、氷水を時々かくはんする。
- 手順7．適当な時間間隔で上部・下部の温度を記録して、温度が安定したことを確かめたのち、ヒーターに流れる電流値、電源電圧を記録する。その間、試料下部の温度が上昇しないように、氷水を時々かくはんする。
- 手順8．上の測定で、安定時の上部の温度 T_1 が室温 T_0 より高い（低い）場合はヒーターにかける電圧をやや減少（増加）させて、手順7を繰り返す。この手順を、 T_0 より高い T_1 と、 T_0 より低い T_1 と（ T_0 を上下からはさむ2つの T_1 ）が得られるまで、測定回数が4シリーズを超えない範囲で繰り返す。
- 手順9．1つの試料の測定が終了したら、電源電圧、電流をゼロとし、2本の温度計をはずし、はんだごてをクリップから静かにはずす。他の試料棒についても同様の測定を繰り返す。ただし、室温は最初の試料棒で測った値をそのまま使用する。

課題1-2-1

- (1) 3種類の金属試料について、上の手順に従って定常熱流の状態において測定した、ヒーターに供給した電圧と電流、試料の両端の温度を表にまとめなさい。表の空白の列は自由に使ってよい。
- (2) 上の**仮定1**が成り立つものとして、各試料についての測定データおよびそれから導いた熱伝導度の値を途中の計算も含めて、表に示しなさい。その表の各行についての説明をつけなさい。その際、有効数字がどこまでかを根拠とともに明示しなさい。なお、試料の直径は6.0 mm、長さは6.0 cm（全長の8.0 cmとは異なることに注意）として計算しなさい。

課題1-2-2

我々が仮定した**仮定1**は、今回行った実験においてある程度の妥当性を持つ一方、厳密には成り立たないと考えられる。妥当である理由、厳密には成り立たない理由のそれぞれ

について，重要と思われる理由を挙げなさい（複数でもよい）。また，測定に際して，仮定が成り立つように工夫した点があれば書きなさい。

課題 1－3 電気伝導度と熱伝導度の関係

課題 1－3－1

課題 1－1 および課題 1－2 で求めた 3 種類の金属の電気伝導度と熱伝導度の値から，これらの中にどのような関係が推定されるか述べなさい。また，その理由についての考察を書きなさい。グラフを利用し，どのような関数関係があると結論付けたか，またその誤差等についても結果を明示し，議論すること。

＜課題 2＞熱放射

物体はその温度に応じて電磁波を放射している。放射される電磁波は広い範囲の波長を含んでいるが、単位波長幅あたりの放射エネルギーが最大となる波長は温度が高くなるにつれて短くなる。たとえば溶けた鉄の温度は約 1800 K であり、放射している電磁波のピークの波長は 1.6 μm の赤外領域にある。そのため、可視光領域では波長の長い赤い光の方が強くなり、赤く見える。一方、太陽の表面温度は約 6000 K であり、放射している電磁波のピークの波長は 500 nm で可視光領域の中央付近にあるため、太陽光は白色に見える。私たちの身の回りにある常温の物体も電磁波を出しているが、温度が低いので 10 μm 程度のかなり長い波長の赤外線にピークがある。したがって、私たちは常温物体の放射する電磁波を見ることはできない。

波長だけでなく、物体の放射する電磁波のエネルギーの総和も、温度に応じて変化し、絶対温度の 4 乗に比例する。たとえば 273 K(0 $^{\circ}\text{C}$)の物体よりも 359 K(86 $^{\circ}\text{C}$)の物体は 3 倍のエネルギーを、546 K(273 $^{\circ}\text{C}$)の物体は 16 倍のエネルギーを放射している。

物体は電磁波を放射すると同時に、まわりの物体から放射されるエネルギーを受け取っている。物体そのものに発熱作用（化学変化やジュール熱など）がない場合、物体自身が放射するエネルギーよりまわりから受け取るエネルギーの方が多いと物体の温度は上昇し、逆の場合は温度は下がる。たとえば赤外線ストーブの前に置かれた物体は、物体が放射するエネルギーよりストーブから受けるエネルギーの方が多いので、物体の温度は上昇する。

電磁波の放射や吸収は物体の表面に左右される。同じ温度の物体でも、金属光沢のものは電磁波を反射するので吸収されるエネルギーは小さく、また放射するエネルギーも小さい。一方表面が黒い物体はエネルギーをよく吸収し、またよく放射する。

この課題 2 では図 2-1 のように、容器内に閉じこめられた発熱体に電流を流して発生した熱の流れについて考察する。伝導、対流、放射の 3 種類の熱の伝わり方のうち、空気

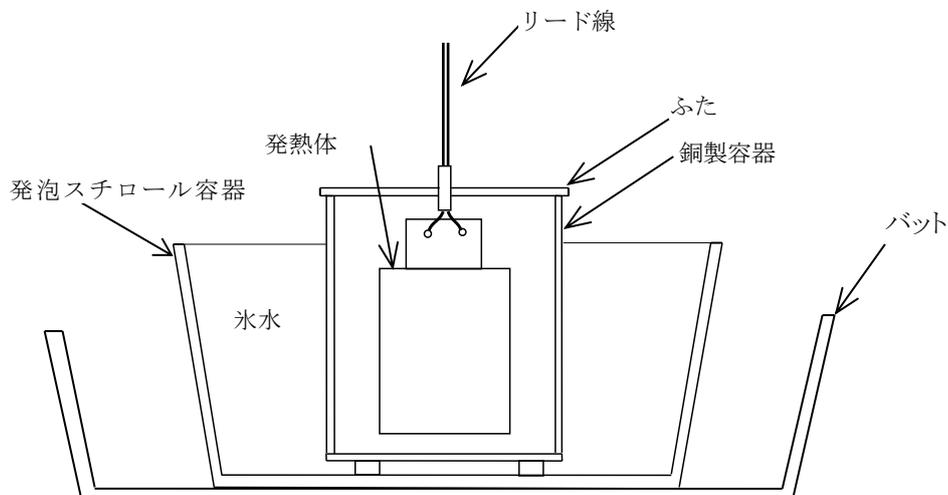


図 2-1 課題 2 の装置

の熱伝導率はきわめて小さいので、ここでは伝導は無視することができる。さらにこの装置では対流による寄与は放射による寄与よりじゅうぶんに小さいと仮定する。この実験装置を使い、温度が一定となった定常状態での発熱体と容器との間での放射エネルギーのやりとりを考え、放射エネルギーが絶対温度の 4 乗に比例することが確かめられるかどうかを検討することが<課題 2>の目的である。

<実験装置の組み立て>

1. 銅製容器とふたがセロハンテープで固定されているので、ていねいにはがす。ふたを持ち上げて、図 2-2 のようにリード線がはんだ付けしている黒い発熱体を確認し、さらに銅製容器の内壁が黒く塗られていることを確認したら、ふたを静かに戻す。

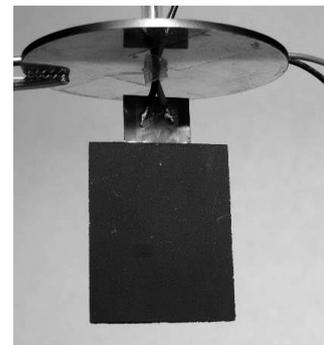


図 2-2 発熱体

2. バットの中に発泡スチロール容器(大)を入れ、銅製容器を発泡スチロール容器に入れる。図 2-3 に示すように、氷を発泡スチロール容器にほぼいっぱいになるまで入れ、さらに、あふれる程度まで水を入れる。(銅製容器内には氷や水を入れないこと。)

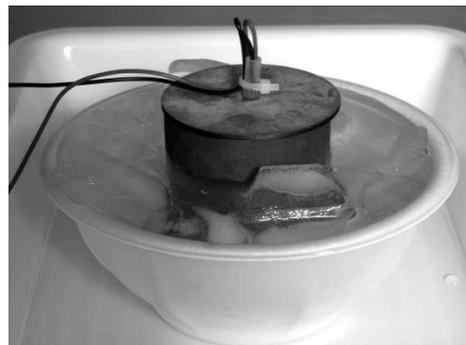


図 2-3 氷水につけられた銅製容器

氷と水は、会場の何箇所かに置いてある保温ケースに入っているなので、各自で必要な時に取りに行くこと。

3. 電源装置に何も接続されていないことを確認し、電源スイッチを押して電源をオンにする。電流(CURRENT)調整つまみを左側(反時計方向)にいっぱい回してから少し右に回す。電圧(VOLTAGE)調整つまみを回して、17.0 V になるように設定する。この設定により、出力電圧が 17.0 V 以下に制限される。以下の電力調整は、電流調節つまみでおこなう。(17 V に制限するのは発熱体の破損を防ぐためである。)

4. 一度電源をオフにし、発熱体に接続されているリード線を図2-4に示したように電源装置につなぐ。発熱体に極性は無い。

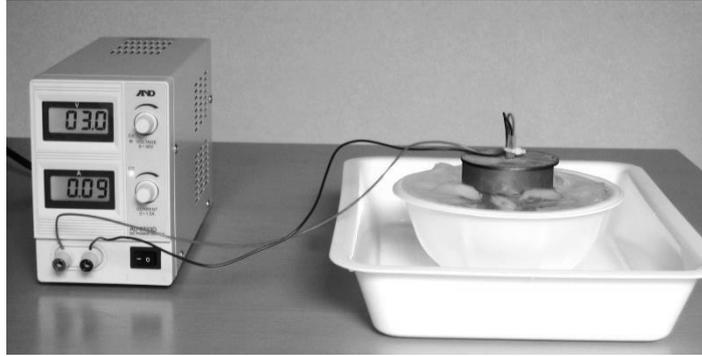


図2-4 電源装置への接続

5. 電流調節つまみのみを回して、電圧が0.0 Vから17.0 Vまで変化することを確認する。電圧調整つまみを回さなければ、電流つまみを右側(時計方向)いっぱいまで回しても、電圧は先ほど設定した17.0 Vを超えることはないはずである。
6. 電流調節つまみを左側(反時計方向)にいっぱいまで回して、電圧を0.0 Vにする。容器が冷えるまで時間がかかるので、しばらくそのままにしておく。その間、課題2-1で放射温度計の動作確認を行いなさい。

課題2-1

<放射温度計の動作確認>

- 放射温度計は、物体に直接触れなくても温度を測定することができる。
- SCANスイッチを押して温度測定部を被測定物に向けると、温度が表示される。
- 応答時間は1秒なので、まずSCANスイッチを押してから被測定物に向け、1秒後に温度を読む。
- 被測定物までの距離と測定範囲は図2-6のように1:1の関係がある。すなわち、10 mmの距離では直径10 mmの円内が測定範囲となる。
- SCANスイッチから手を離し、15秒間何も操作しないと自動的に電源が切れる。
- 机、手のひら、氷の温度を各3回測定して、解答用紙に記入しなさい。

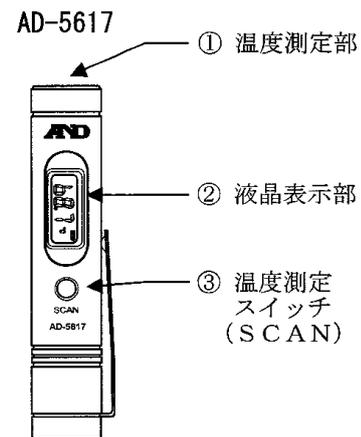


図2-5 各部の名称

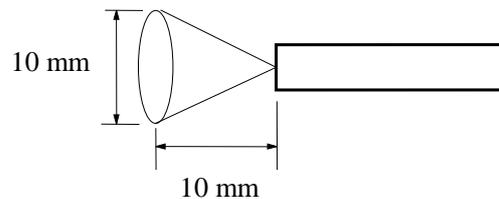


図2-6 測定範囲

課題 2 - 2

電源装置の電源を入れ、電流調節つまみを回して、電源電圧を 5 V から 17 V まで 4 V 間隔で変化させて、つぎの測定を行いなさい。途中で氷が少なくなったら、随時補充しなさい。

- ①電圧設定後 3 分程度経過してから、ふたを持ち上げて発熱体中央部の温度を放射温度計で測る。電圧が上がると発熱体は高温になるので、直接手を触れないように注意する。ふたを上げると温度はすぐに変化してしまうので手早く測定し、ふたを戻す。ふたはかなり冷たくなっているので、持ち上げるときには手袋を使ってもよい。
- ②ときどき氷水をかくはんし、1~2 分ごとに発熱体中央部の温度を測定する。温度変化のグラフを書いて、温度がほぼ一定になったと判断したら、その温度を記録する。
- ③電源装置に表示されている電圧、電流を記録する。
- ④図 2 - 7 を参考にして容器内壁の温度を手早く 3 回測定し、その平均を計算する。ただし、3 つの測定値の内、極端にずれているものは除く。
- ⑤すべての測定が終わったら、電源装置の電圧、電流つまみを最小にして、電源を切る。氷水を所定のバケツに捨てる。

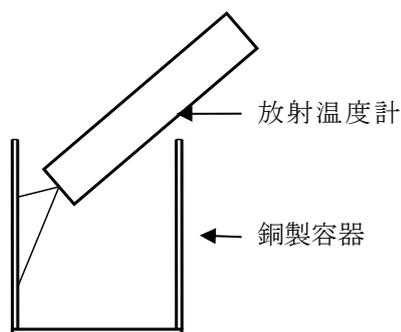


図 2 - 7 容器内壁側の温度測定

課題 2 - 3

- (1) これらの測定データから、物体から放射されるエネルギーは絶対温度の 4 乗に比例することを検証するには、どのような方法が考えられるか。その方法を示しなさい。なお、 $0^{\circ}\text{C}=273\text{ K}$ とする。
- (2) あなたが考えた方法に従ってデータを処理し、考察しなさい。解答用紙の表や方眼は自分で工夫して使いなさい。

<ボーナス課題> (余裕があったらチャレンジしなさい。ボーナス点を与えます。)

課題 2 - 4

下のシュテファン=ボルツマンの法則がこの実験条件下でも成り立つと仮定すると、発熱体の温度と表面積、および容器内壁の温度から、放射によって運ばれる熱流（単位時間に運ばれるエネルギー）が計算できる。この計算結果と実験結果を比較して、発熱体から容器内壁に運ばれたエネルギーのうち、放射によって運ばれた割合を見積りなさい。結果だけではなく、考え方や途中の計算も示しなさい。なお、発熱体の表面積は、 $35\text{ mm} \times 45\text{ mm} \times 2$ である。

シュテファン=ボルツマンの法則

黒体（入射したすべての波長の電磁波を、反射したり透過させたりすることなく、すべて吸収すると考えられる理想的物体）の表面から放射される電磁波のエネルギー流束密度（単位面積を単位時間に通過するエネルギー） J [$\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) = \text{W}/\text{m}^2$] は、その黒体の絶対温度 T [K] の 4 乗に比例する。すなわち、

$$J = \sigma T^4 \quad (6)$$

が成り立つ。ここで、比例係数はシュテファン=ボルツマン定数とよばれ、量子力学を用いて、

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4) \quad (7)$$

となることが知られている。ただし、 c は真空中の光速、 h はプランク定数、 k はボルツマン定数である。

チャレンジ番号	氏 名

課題 1 - 1 - 1

点

試料	抵抗値あるいは「測定不能」
銅棒	
真鍮棒	
アルミニウム棒	

測定に際し、特に工夫した点：

チャレンジ番号	氏 名

課題 1-1-2 (1)

点

組み立て図

特に注意した点

チャレンジ番号	氏 名

課題 1-1-2 (2)

点

銅に関する測定値

電流 \ 間隔	5 cm	10 cm	15 cm	25 cm	30 cm
0.5 A					
1.0 A					
1.5 A					

真鍮に関する測定値

電流 \ 間隔	5 cm	10 cm	15 cm	25 cm	30 cm
0.5 A					
1.0 A					
1.5 A					

アルミニウムに関する測定値

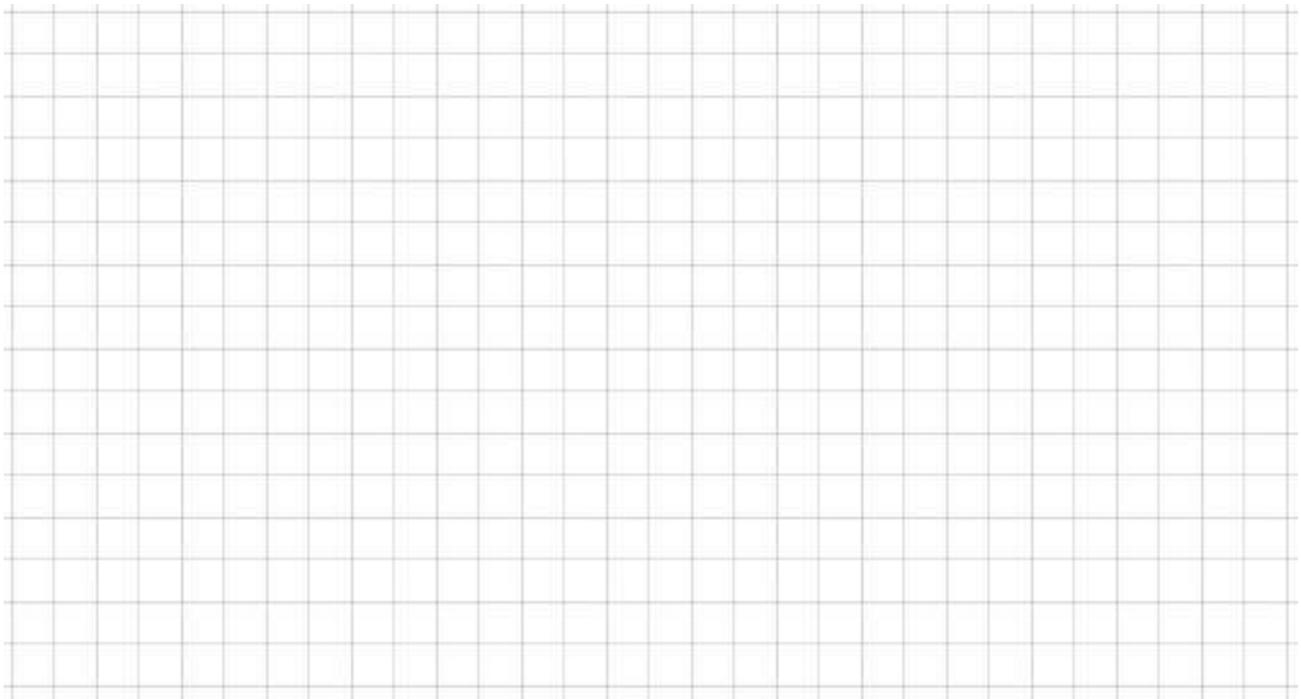
電流 \ 間隔	5 cm	10 cm	15 cm	25 cm	30 cm
0.5 A					
1.0 A					
1.5 A					

チャレンジ番号	氏 名

課題 1 - 1 - 2 (3)

点

銅に関する結果



チャレンジ番号	氏 名

真鍮に関する結果

アルミニウムに関する結果

チャレンジ番号	氏 名

課題 1-1-2 (4)

点

銅に関する結果：電気抵抗=, 電気伝導度=

計算と説明：

真鍮に関する結果：電気抵抗=, 電気伝導度=

計算と説明：

アルミニウムに関する結果：電気抵抗=, 電気伝導度=

計算と説明：

チャレンジ番号	氏 名

課題 1-1-2 (5)

点

銅に関する結果

真鍮に関する結果

アルミニウムに関する結果

チャレンジ番号	氏 名

課題 1 - 1 - 3

点

チャレンジ番号	氏 名

課題 1-2-1 (1)

点

銅に関する結果 室温 $T_0 =$

	電圧 V	電流 I	上部温度 T_1	下部温度 T_2	
1 回目					
2 回目					
3 回目					
4 回目					

真鍮に関する結果 室温 $T_0 =$

	電圧 V	電流 I	上部温度 T_1	下部温度 T_2	
1 回目					
2 回目					
3 回目					
4 回目					

アルミニウムに関する結果 室温 $T_0 =$

	電圧 V	電流 I	上部温度 T_1	下部温度 T_2	
1 回目					
2 回目					
3 回目					
4 回目					

チャレンジ番号	氏 名

課題 1 - 2 - 1 (2)

点

試料材質	銅	真鍮	アルミニウム

補足説明

チャレンジ番号	氏 名

課題 1 - 2 - 2

点

・ 妥当である理由

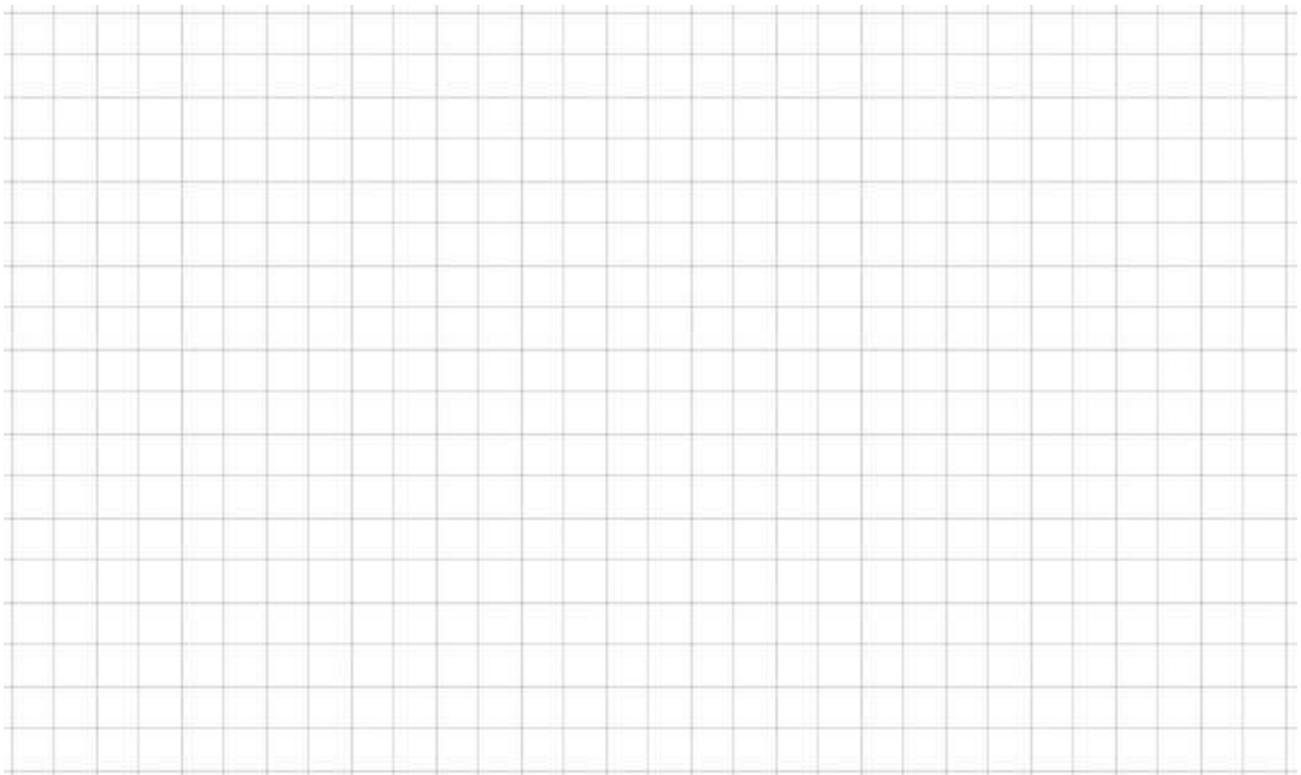
・ 成り立たない理由

・ 工夫した点

チャレンジ番号	氏 名

課題 1 - 3 - 1

点



チャレンジ番号	氏 名

点

課題 2 - 1

\	1 回目	2 回目	3 回目
机			
手のひら			
氷			

チャレンジ番号	氏 名

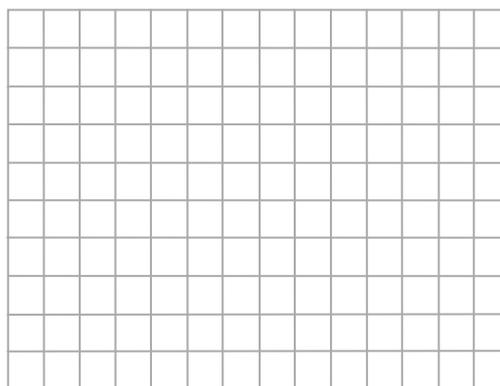
点

課題 2 - 2 (1)

設定電圧 _____ V

時間	発熱体の温度

発熱体の温度変化



発熱体の温度がほぼ一定になったときの

発熱体の温度	電圧	電流

容器内壁の温度

1 回目	2 回目	3 回目	平均

チャレンジ番号	氏 名

課題 2-4 (ボーナス課題)

点

チャレンジ番号	氏 名

課題 1 - 1 - 1

点

試料	抵抗値あるいは「測定不能」
銅棒	測定不能 または 安定した値が出ない
真鍮棒	測定不能 または 安定した値が出ない
アルミニウム棒	測定不能 または 安定した値が出ない

測定に際し、特に工夫した点：

接点を安定にするための工夫、クリップつきコードを使ってつなぐ など

チャレンジ番号	氏 名

課題 1 - 1 - 2 (1)

点

組み立て図

注意点：結線に間違いがないか。

図の判断に必要な情報が記載されているか

特に注意した点

注意点：記載された点の実験的に意味があるか

チャレンジ番号	氏 名

課題 1 - 1 - 2 (2)

点

銅に関する測定値

電流 \ 間隔	5 cm	10 cm	15 cm	25 cm	30 cm
0.5 A	0.0mV	0.2mV	0.3mV	0.6mV	0.7mV
1.0 A	0.2mV	0.5mV	0.7mV	1.3mV	1.6mV
1.5 A	0.3mV	0.7mV	1.2mV	2.1mV	2.5mV

真鍮に関する測定値

電流 \ 間隔	5 cm	10 cm	15 cm	25 cm	30 cm
0.5 A	0.5mV	1.1mV	1.7mV	2.9mV	3.6mV
1.0 A	1.1mV	2.3 mV	3.5 mV	5.9 mV	7.2 mV
1.5 A	1.7 mV	3.5 mV	5.3 mV	9.0 mV	10.8 mV

アルミニウムに関する測定値

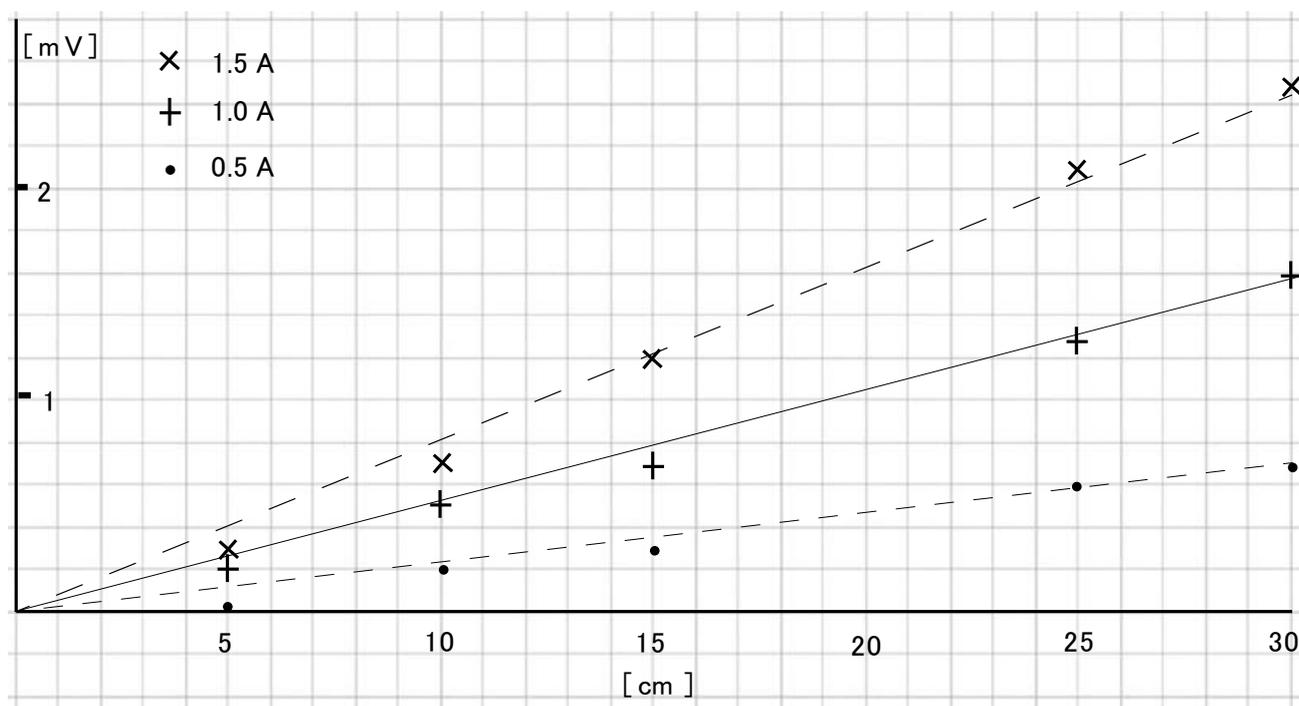
電流 \ 間隔	5 cm	10 cm	15 cm	25 cm	30 cm
0.5 A	0.1 mV	0.2 mV	0.4 mV	0.8 mV	0.9 mV
1.0 A	0.2 mV	0.6 mV	0.9 mV	1.7 mV	2.0 mV
1.5 A	0.4 mV	0.9 mV	1.4 mV	2.5 mV	3.0 mV

チャレンジ番号	氏 名

課題 1-1-2 (3)

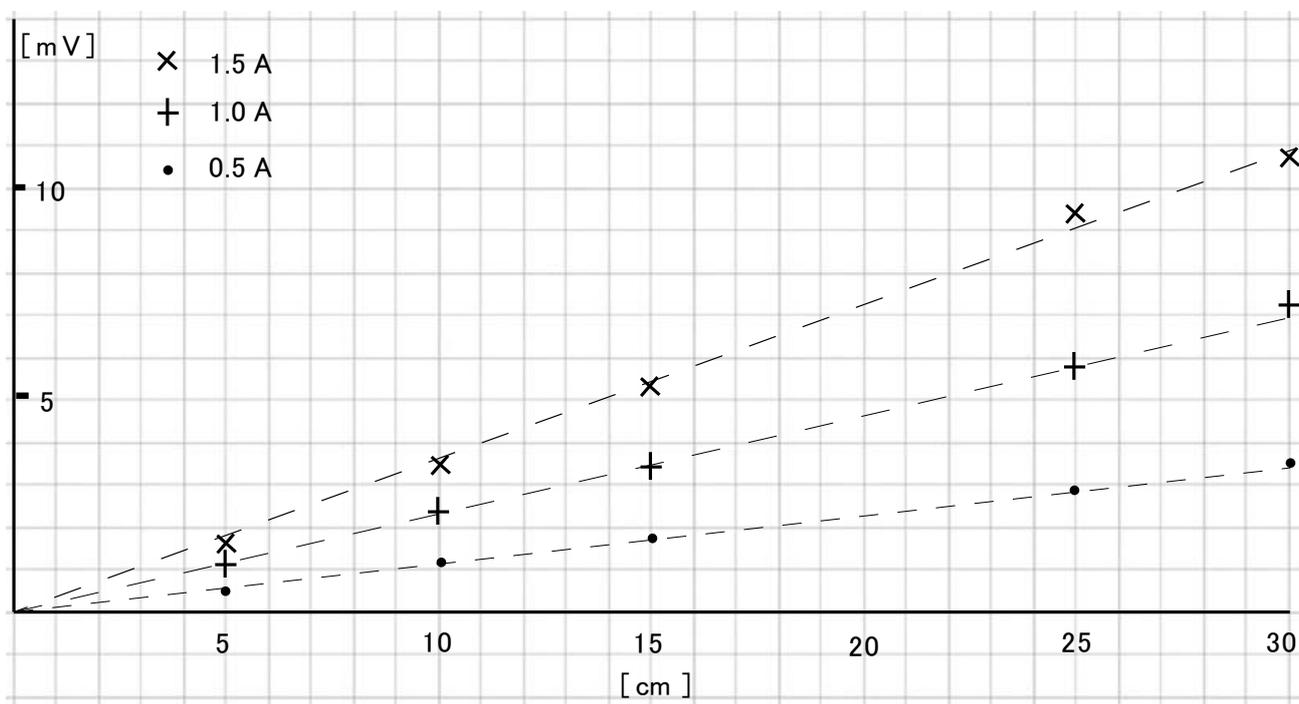
点

銅に関する結果

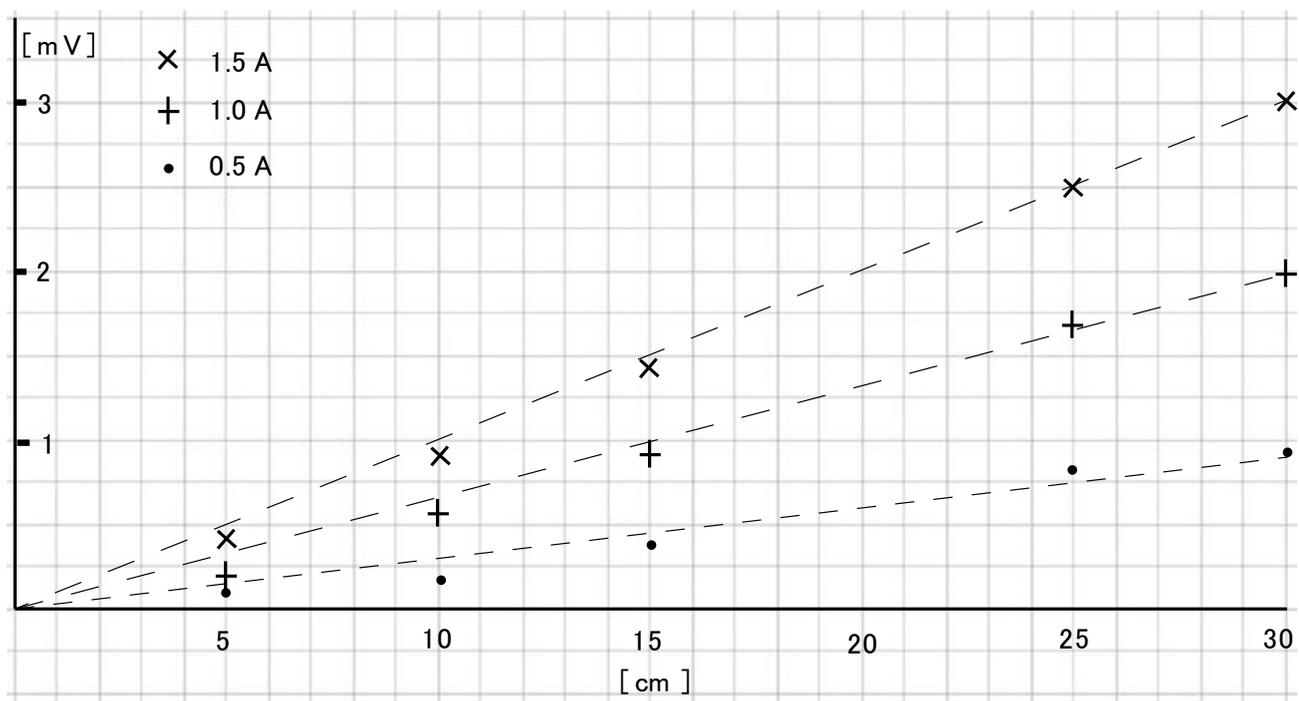


チャレンジ番号	氏名

真鍮に関する結果



アルミニウムに関する結果



チャレンジ番号	氏 名

課題 1-1-2 (4)

点

銅に関する結果：電気抵抗 = $1.7 \times 10^{-3} \Omega$ 電気伝導度 = $5.6 \times 10^7 \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$

計算と説明： $R = 2.5 \text{ mV} / 1.5 \text{ A}$ $\sigma = 1/\rho$ $\rho = R(S/L)$ $S = (0.0010)^2 \pi \text{ m}^2$
 $= L/(RS)$ $L = 0.30 \text{ m}$
 $\rho = 1.8 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$

真鍮に関する結果：電気抵抗 = $7.2 \times 10^{-3} \Omega$ 電気伝導度 = $1.4 \times 10^7 \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$

計算と説明： $R = 10.8 \text{ mV} / 1.5 \text{ A}$ $\sigma = 1/\rho$ $\rho = R(S/L)$ $S = (0.0010)^2 \pi \text{ m}^2$
 $= L/(RS)$ $L = 0.30 \text{ m}$
 $\rho = 7.4 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$

アルミニウムに関する結果：電気抵抗 = $2.0 \times 10^{-3} \Omega$ 電気伝導度 = $2.1 \times 10^7 \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$

計算と説明： $R = 3.0 \text{ mV} / 1.5 \text{ A}$ $\sigma = 1/\rho$ $\rho = R(S/L)$ $S = (0.0015)^2 \pi \text{ m}^2$
 $= L/(RS)$ $L = 0.30 \text{ m}$
 $\rho = 4.7 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$

チャレンジ番号	氏 名

課題 1 - 1 - 2 (5)

点

銅に関する結果

オームの法則はなりたっている 抵抗と電流の逆依存性 長さに直線依存
 問題点：区間長さの短い場合の直線性からのずれ

真鍮に関する結果

オームの法則はなりたっている

アルミニウムに関する結果

オームの法則はなりたっている

チャレンジ番号	氏 名

点

課題 1 - 1 - 3

①測定電流の増加による検出感度の増加

②接触抵抗の影響を排除できる

【解説】

試料の電気抵抗値は、図 1 のように試料に電流を流し、試料に流れる電流と試料両端の電圧を測定することによってオームの法則から計算することができる。デジタルマルチメータの抵抗測定レンジによる測定でも同じ原理である。しかし、今回の場合のように抵抗値が小さい場合には、電圧降下が小さすぎてうまく測定することができない。そこで、電源装置を使って大きな電流を流し、電圧降下を大きくして検出感度をあげることにより、測定が可能になる。

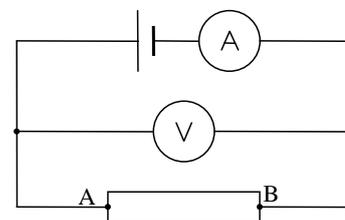


図 1

また、試料の電気抵抗値が小さいと、測定端子と試料との間の接触抵抗を無視することができない。図 1 で、試料の抵抗を R 、リード線と試料との接触点 A、B における抵抗を R_A 、 R_B とすると、図 1 は図 2 のように書き直すことができる。結局電圧計では $R_A + R_B + R$ による電圧降下を測定していることになる。

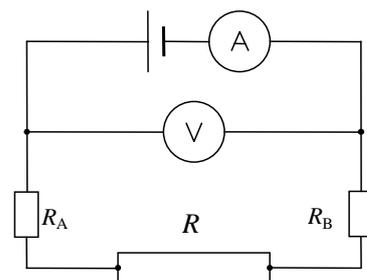


図 2

このような接触抵抗の影響を排除しようと考えられたのが、図 3 のような四端子法である。ここで R_C 、 R_D は電圧計のリード線と試料との接触抵抗である。電圧計の内部抵抗は、接触抵抗 R_C 、 R_D よりもはるかに大きいので、接触抵抗による電圧降下は無視することができる。また試料の抵抗が電圧計の内部抵抗よりはるかに小さければ、電圧計に流れる電流は無視することができる。このようにして、試料両端の電圧を正確に測ることができる。一方、 R_A 、 R_B がいくつであっても、試料に流れる電流は電流計で測定することができる。

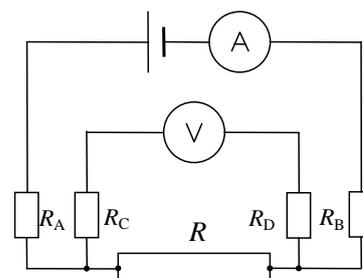


図 3

今回の実験では、接触抵抗が 0.5Ω 程度、試料の抵抗が数 $m\Omega$ 程度なので、四端子法でないと測定できないことがわかる。

チャレンジ番号	氏 名

課題 1-2-1 (1)

(最終的に T_1 がほぼ室温になったデータのみ記載)

点

銅に関する結果 室温 $T_0 =$

	電圧 V	電流 I	上部温度 T_1	下部温度 T_2	
1 回目	25.4V	0.14A	30.0°C	2.7°C	
2 回目					
3 回目					
4 回目					

真鍮に関する結果 室温 $T_0 =$

	電圧 V	電流 I	上部温度 T_1	下部温度 T_2	
1 回目	25.4V	0.14A	30.0°C	2.7°C	
2 回目					
3 回目					
4 回目					

アルミニウムに関する結果 室温 $T_0 =$

	電圧 V	電流 I	上部温度 T_1	下部温度 T_2	
1 回目	15.8V	0.10A	30.0°C	3.2°C	
2 回目					
3 回目					
4 回目					

チャレンジ番号	氏 名

課題 1 - 2 - 1 (2)

点

試料材質	銅	真鍮	アルミニウム
熱流 Q (W)	3.5	1.2	1.6
長さ L (m)	0.06	0.06	0.06
断面積 S (m ²)	2.8×10^{-5}	2.8×10^{-5}	2.8×10^{-5}
温度差 ΔT (°C)	27.3	27.3	26.8
K (W/(m · K))	2.8×10^2	0.94×10^2	1.3×10^2
σ (Ω ⁻¹ m ⁻¹)	$5.6 (\times 10^7)$	$1.4 (\times 10^7)$	$2.1 (\times 10^7)$
$K/\sigma (\times 10^5)$	0.50	0.67	0.62

補足説明

チャレンジ番号	氏 名

課題 1 - 2 - 2

点

・ 妥当である理由

熱流測定の高温側温度を室温に設定することにより、発熱体であるハンダごてヒーターから試料へ流れる以外には、外部との放熱および熱流入などによる熱移動が小さくなるから。

・ 成り立たない理由

試料そのものには、室温と氷水温度をつなぐ温度勾配があるため、この部分と外部との熱の移動があるため。この原因は試料周囲の空気対流による熱流入が主であり、熱放射によるものは、この実験の測定温度範囲では無視できる。一方、熱伝導度の大きい試料では、発熱体の温度は高温側温度（室温）より高くなる。この場合の熱損失は、電流導線を介したもの、ヒーター周辺の対流などによるものがある。さらに温度計を介した外部からの熱流入がある。

・ 工夫した点

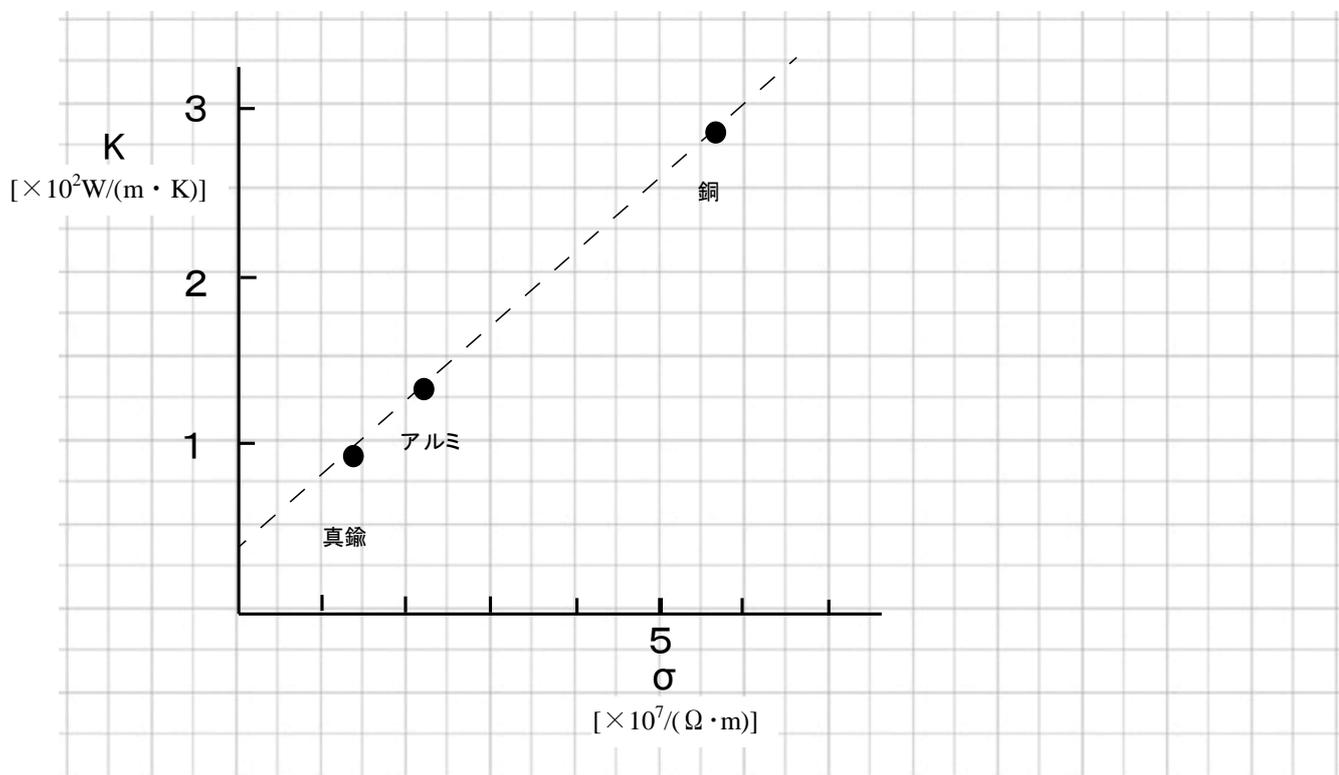
試料温度が室温より低くなることによる外部からの熱流入を防ぐには試料周囲で対流がおきないようにする。試料と接触させないように周囲を断熱材で覆い、定常状態になるまで十分時間をかけ待つなどの工夫が有効。さらに温度計に極細熱電対など、測定器の影響が無視できるものを選ぶとよい。

チャレンジ番号	氏 名

課題 1 - 3 - 1

点

電子による熱移動以外の寄与があることがわかる。(固体の熱伝導)



チャレンジ番号	氏 名

点

課題 2 - 1
(省略)

\	1 回目	2 回目	3 回目
机			
手のひら			
氷			

チャレンジ番号	氏 名

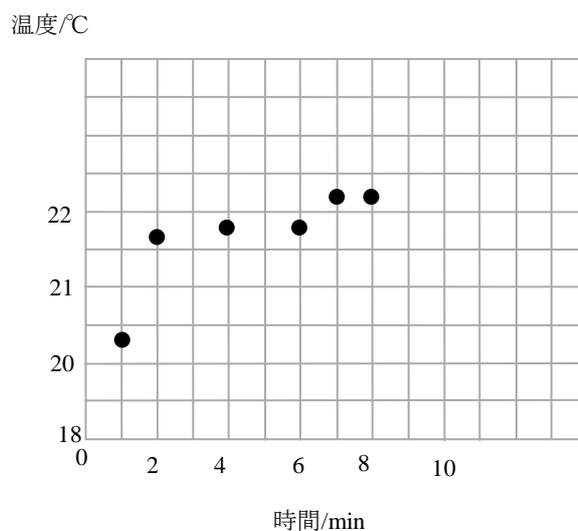
点

課題 2-2 (1)

設定電圧 5.0 V

時間/min	発熱体の温度/°C
1	20.8
2	21.6
4	21.8
6	21.8
7	22.2
8	22.2

発熱体の温度変化



発熱体の温度がほぼ一定になったときの

発熱体の温度/°C	電圧/V	電流/A
22.2	5.0	0.15

容器内壁の温度/°C

1 回目	2 回目	3 回目	平均
7.4	0.4	0.4	0.4

チャレンジ番号	氏 名

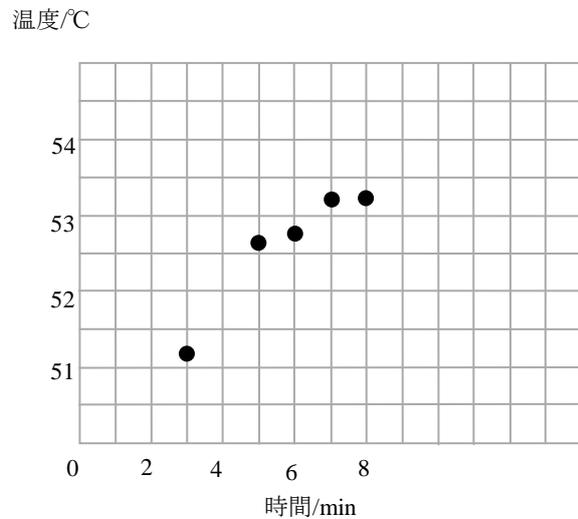
点

課題 2 - 2 (2)

設定電圧 9.0 V

時間/min	発熱体の温度/°C
3	51.2
5	52.6
6	52.8
7	53.2
8	53.2

発熱体の温度変化



発熱体の温度がほぼ一定になったときの

発熱体の温度/°C	電圧/V	電流/A
53.2	9.0	0.26

容器内壁の温度/°C

1 回目	2 回目	3 回目	平均
0.6	1.0	0.8	0.8

チャレンジ番号	氏 名

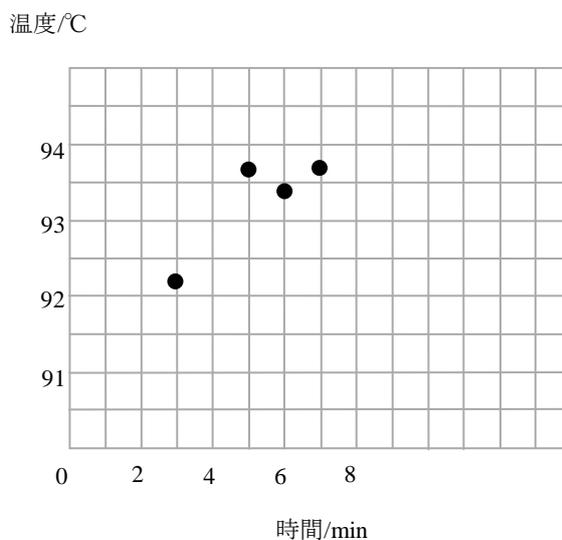
点

課題 2 - 2 (3)

設定電圧 13.0 V

時間/min	発熱体の温度/°C
3	92.2
5	93.6
6	93.4
7	93.6

発熱体の温度変化



発熱体の温度がほぼ一定になったときの

発熱体の温度/°C	電圧/V	電流/A
93.6	13.0	0.38

容器内壁の温度/°C

1 回目	2 回目	3 回目	平均
0.6	0.8	1.0	0.8

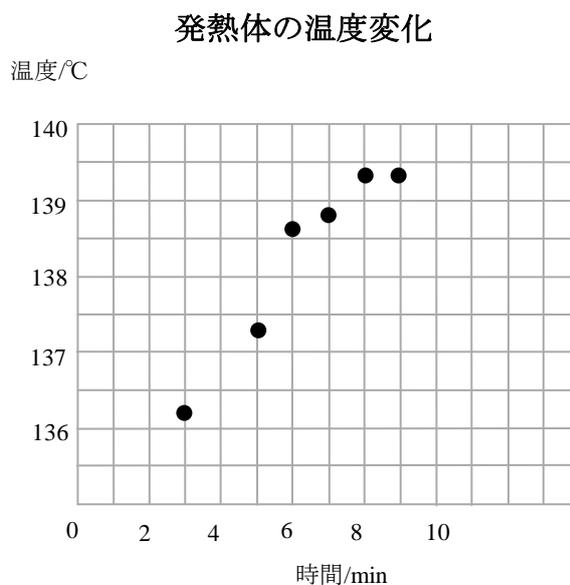
チャレンジ番号	氏 名

点

課題 2 - 2 (4)

設定電圧 17.0 V

時間/min	発熱体の温度/°C
3	136.2
5	137.4
6	138.6
7	138.8
8	139.4
9	139.4



発熱体の温度がほぼ一定になったときの

発熱体の温度/°C	電圧/V	電流/A
139.4	17.0	0.49

容器内壁の温度/°C

1 回目	2 回目	3 回目	平均
1.6	1.4	1.6	1.6

チャレンジ番号	氏 名

点

課題 2 - 3

(1)

発熱体と銅製容器の間には、放射エネルギーのやりとりがある。放射エネルギーが物体の絶対温度の 4 乗に比例するならば、2 物体それぞれの絶対温度の 4 乗の差が、放射によって運ばれる正味のエネルギーに比例することになる。

発熱体から容器に運ばれるエネルギーがほとんど放射によるものと仮定すれば、発熱体に供給される電力が、発熱体から運ばれる正味の（単位時間あたりの）エネルギーになるはずである。

したがって電力と 2 物体それぞれの絶対温度の 4 乗の差が比例するかどうかを調べればよい。

課題 2 - 3

(2)

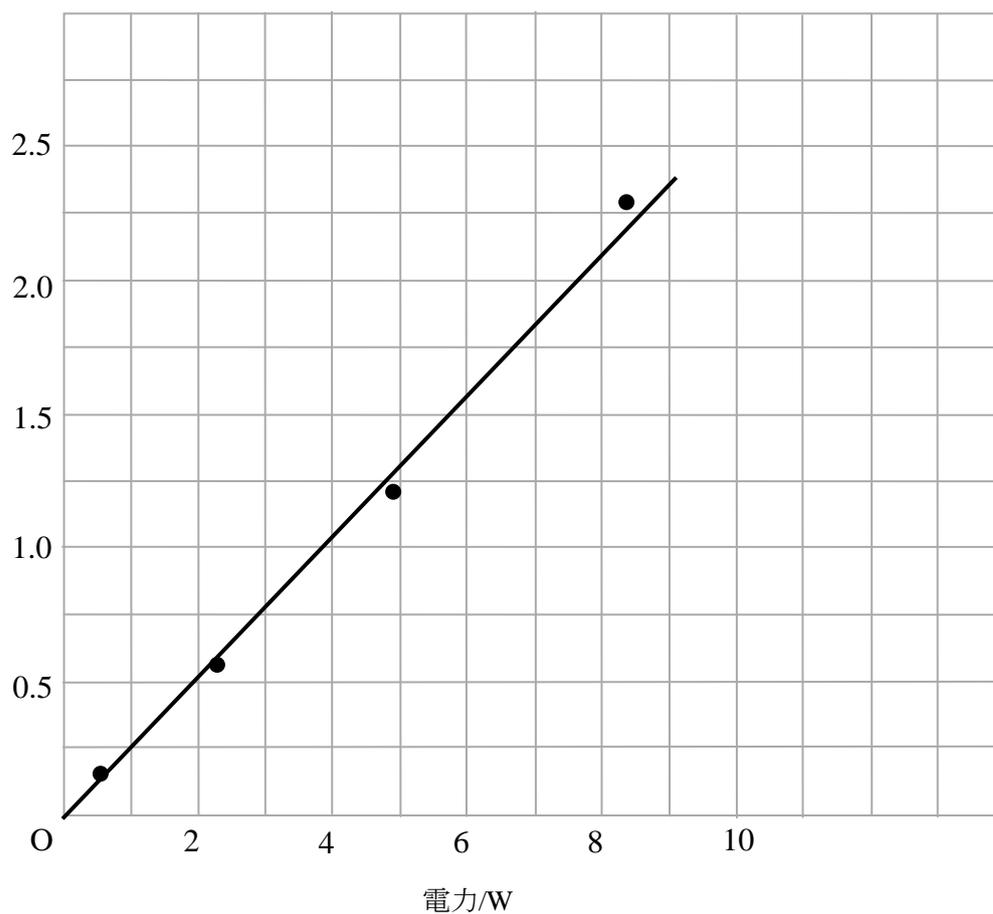
電圧/V	電流/A	電力/W	発熱体温度 /K	容器内壁 温度/K	$(T^4 - T_0^4)$ / $10^{10}K^4$
5.0	0.15	0.75	295.2	273.4	0.20
9.0	0.26	2.34	326.2	273.8	0.57
13.0	0.38	4.94	366.6	273.8	1.24
17.0	0.49	8.33	412.4	274.6	2.32

チャレンジ番号	氏 名

点

課題 2 - 3
(2)

$$(T^4 - T_0^4) / 10^{10} \text{K}^4$$



考察

チャレンジ番号	氏 名

点

課題 2-4 (ボーナス課題)

課題 2-3 のグラフの傾きは $2.7 \times 10^9 \text{K}^4/\text{W}$ である。一方、シュテファン・ボルツマンの法則より

$$\begin{aligned} \frac{(T^4 - T_0^4)}{P} &= \frac{1}{\sigma S} \\ &= \frac{1}{5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4) \times (35 \times 45 \times 2) \times 10^{-6} \text{m}^2 \times 2.32 \times 10^{10} \text{K}^4} \\ &= 5.6 \times 10^9 \text{K}^4/\text{W} \end{aligned}$$

となる。

したがって、放射によって運ばれたエネルギーは、電力によって供給された電力の約半分と見積もることができる。