

8. 電気抵抗



電気抵抗の実験へようこそ。

ここでは、ホイートストン・ブリッジを用いて導体の電気抵抗を精度良く求める方法を学びます。また電気抵抗の温度変化を、金属と半導体について測定することで両者の性質の決定的な違いが理解できると思います。

このテキストでは実験を行う上での注意点や、うまくデータを取るためのコツのようなものを紹介していきます。

前期の実験と同様に、データの収集や解析の際には一部（あるいは全部）パソコンを用います。

測定を始める前に“マイドキュメント”フォルダに新しいフォルダを作成して下さい。フォルダ名は今日の日付（例えば 2003 年 1 月 15 日ならば「20030115」など）にして下さい。

そして保存したいデータやグラフは、全て作成したフォルダの中に保存するようにして下さい。

2. 実験の概要

本実験では、電気抵抗の測定にホイートストン・ブリッジを用います。ホイートストン・ブリッジについては、テキストに詳しく書かれていますので、そちらを参照して下さい。

テキストには実験装置として P.O.箱が紹介されています。
しかしながら接触がうまくとれないことがある等の不具合があったため、現在は 3. 「[実験装置](#)」のように抵抗箱と可変抵抗を別々に用意するように変更しています。

また、試料の温度を測定する温度計には白金抵抗測温体(前期に「固体の比熱」で用いたもの)を使用します。

これは、マルチメーターを用いて 4 端子法(電圧 $\times 2$, 電流 $\times 2$)で測定した抵抗値をソフトウェアで温度に換算して読むことが出来ます。

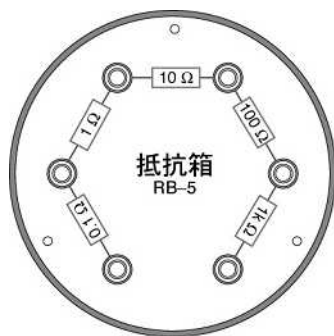
試料の温度を測定する際には、試料とともに試験管の絶縁油に浸して下さい。測定試料を交換する際には、温度計も差し換えて使います。その際に、油で書類や衣服を汚損しない様注意して下さい。

実験の概要は以下の通りです。

1. 回路の作成, 動作のチェック
2. 室温での銅線の抵抗測定
3. 電気抵抗の温度変化(銅線)
4. 同上(サーミスター)
5. 実験結果のグラフ作成. 抵抗-温度の実験式を求める。

それぞれの詳しい手順は、左のリンクの [4 番](#) および [5 番](#) を参照して下さい。

3. 実験装置

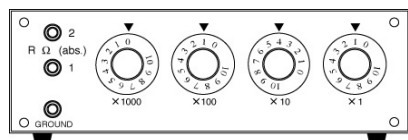


抵抗箱

0.1 Ω から 1 k Ω までの 5 種類の抵抗を一つの箱にまとめたものです。

各グループに 2 個ずつ用意してあります。ホイートストン・ブリッジの抵抗 P, Q の部分に使用します。

使用する際には使いたい抵抗の両側の **2 つの端子のみを使用**します。



可変抵抗器

正面の 4 つのダイヤルを変化させることで、左側の端子 1, 2 の間の抵抗値を変化させることができます。下の端子 (GROUND) は使用しません。

ダイヤル上の矢印で示された、4 つの数字が抵抗値 (4 桁, 単位:) を表しています。

抵抗の設定可能範囲は 1 ~ 11110 です。

0 にはできないので注意して下さい。



白金抵抗測温体

抵抗体として高純度を達成しやすい Pt を用いた抵抗温度計です。抵抗値および温度係数は JIS による規格 (C1604) があります。抵抗素子はステンレスの保護管の先端部に内蔵されています。保護管内部は絶縁材が充填されている (シース型) ため、応答性の良い測定が可能です。

4 端子法により抵抗値を測定し、ソフトウェアにより温度に換算します。

試料

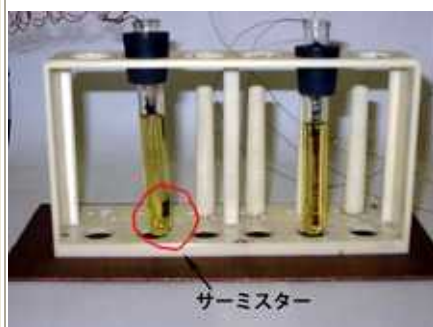
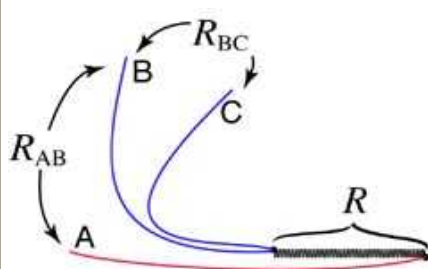
(a) 金属抵抗体

直径 $(1.00 \pm 0.08) \times 10^{-4} \text{ m}$

長さ $(3.00 \pm 0.02) \text{ m}$



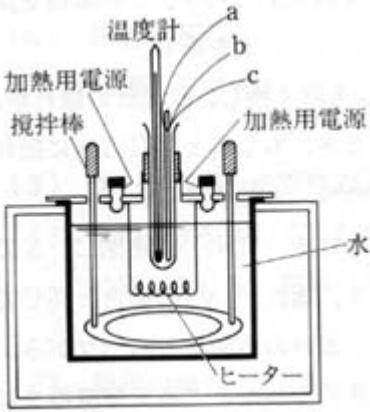
の純銅線で、絶縁管にコイル状に巻かれています。銅線コイルの下端にはリード線 A が、上端には 2 本のリード線 BC が取り付けられています。3 本のリード線が取り付けられているのは、リード線の分の抵抗を差し引くためです。



(b) 半導体抵抗体

エアコンなどの一般的な温度センサーとして市販されているサーミスター (thermistor) を試料として用いています。こちらは本実験での測定温度範囲では、最低でも 200 程度の抵抗を持っているため、リード線の部分の抵抗は無視できます。そのためこちらにはリード線は 2 本しかついていません。

2 つの試料は下の写真のように、熱伝導を良くするために絶縁油に浸されています。銅線による抵抗体の方は、やや長いので、全体が油に浸るようにして下さい。足りない場合は、油を足して下さい。温度の測定は上の白金抵抗測温体の先端をこの試験管の中に差し込んで行います。

	<p style="text-align: center;">加熱用水槽</p> <p>実際に使用する装置は，テキストにあるような左の図とは多少構造が異なりますが，機能は全く同じです．ヒーター線の巻かれた金属容器に水道水を入れて用います．ヒーター線はスライダックに接続されています．スライダックを最大まで上げると，およそ1分間に2度程度 水温が上昇します．</p> <p>試料は試験管ごとアクリル製のふたに開けられた穴から容器に入れて下さい．試料全体が温められるように水位を調節する必要があります．(各テーブルに置いてあるイラストを参照して下さい．)</p> <p>水温が均一になるように攪拌棒が取り付けられていますので，測定中はこまめに(ほぼ終始)かき混ぜて下さい．</p> <p>測定試料を交換する際には，水を入れ替えて下さい．</p>
<p style="text-align: center;">検流計・分流器・電池</p> <p>検流計：全目盛り ± 25，電流感度 $0.9 \mu\text{A}/\text{DIV}$</p> <p>分流器：$20 \Omega$ の抵抗 (検流計と並列に繋いで過電流が流れるのを防ぎます．)</p> <p>電池：1.5 V の乾電池</p>	

4. 実験手順

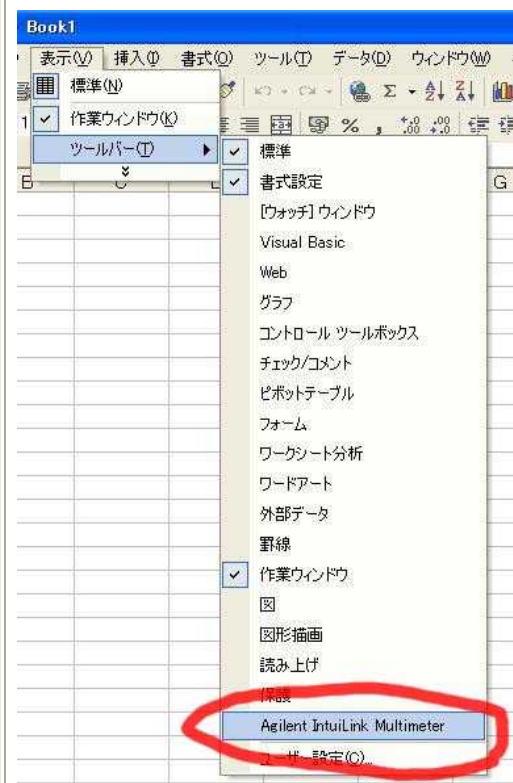
A. 温度計の使い方

(i)

まず, 白金抵抗測温体をマルチメーターに接続して, メーターの電源を入れる.

デスクトップにある“Agilent IntuiLink アドイン”のアイコンをダブルクリックして起動する.

Microsoft Excel とともに左図のようなツールバーが現れる.



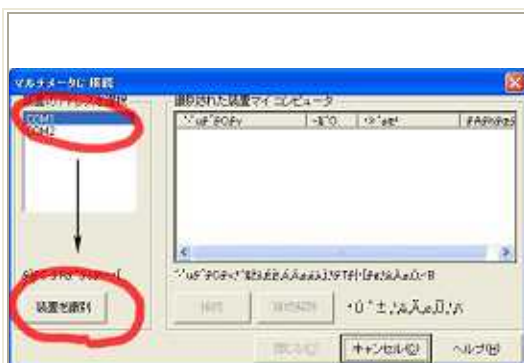
(ii)

もしツールバーが出てこない場合は, 左図のように“表示”->“ツールバー”->“Agilent IntuiLink Multimeter”を選択すれば, 表示される.

(iii)

ツールバー左端のボタン (“マルチメーターに接続”) をクリックする.





(iv)

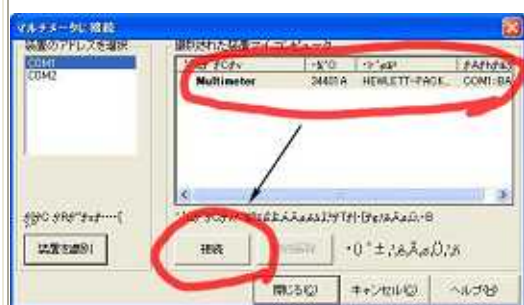
すると、左のような“マルチメータに接続”ダイアログボックスが現れる。

左側の“装置のアドレスを選択”欄で COM1 を選んで、下の“装置を識別”ボタンをクリックする。



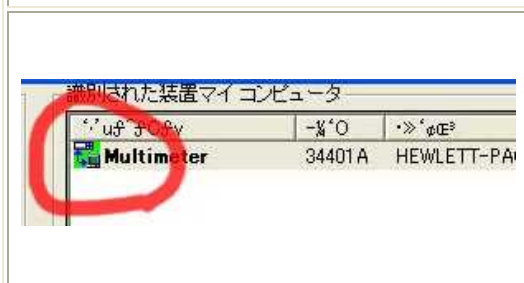
(v)

左図のような、マルチメータとの通信に関する設定画面があらわれるので、そのまま OK ボタンをクリックする。



(vi)

右側のリストに、接続されているマルチメータが表示されているので、選択して下の接続ボタンをクリックする。




(vii)

左の図のように、装置名の横に接続されていることを示す(と思われる)アイコンが表示されたら、このダイアログボックスを閉じる。



(viii)

温度の測定を開始するときには、左の図に示した、“ロギングワー

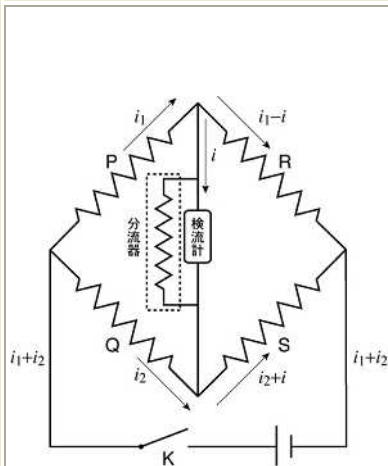
	クシートを設定 / 実行”(左から 5 こ目)のボタンをクリックする。
	<p>(ix)</p> <p>左の設定画面では, 温度測定の間隔と, 全体の測定時間を設定する。</p> <p>測定間隔は, 5 秒間隔に設定すれば十分である。</p> <p>温度変化の測定中は抵抗値を測定</p> <p>そのときの最新の温度表示をパソコンの画面上で見る。</p> <p>という要領で行う。</p> <p>実験結果はノートに記録する。</p> <p>“測定時間”は最低でも 1 時間以上に設定すること。(一つの試料の測定は 30 ~ 40 分で終了する。)</p> <p>OK ボタンをクリックすれば, 測定がスタートする。</p>

B. 金属（銅線）の電気抵抗の測定

注意: 抵抗箱の 0.1 および 1 の抵抗は、抵抗値のずれが大きいいため使用を避けて下さい。

(i)

加熱用水槽に水道水を適量入れ、試料の銅線を絶縁油の入った試験管の中に入れる。絶縁油が足りない場合は、試料全体が浸るように適宜足すこと。



(ii)

可変抵抗器 (S)、抵抗箱 (P, Q)、検流計、分流器、乾電池、試料 (銅線の端子 A と B)、スイッチを左の図のように接続する。

可変抵抗器への接続は、端子 1 および 2 を使用する。(“GROUND”端子は使用しない。) 検流計と並列に分流器を左図のように繋ぐ。検流計の感度を上げるために、おおまかな抵抗値が分かった後では分流器は取り外す。

(iii)

まず、P と Q の部分の抵抗を等しくとり (例えば $P = Q = 100$), S の部分を短絡して瞬間的にスイッチ K をおす。検流計の振れが左であるか右であるかを見る。

(iv)

可変抵抗器の抵抗値 S を大きめ (例えば 5000) に設定し、 $P / R > Q / S$ となるようにする。再びスイッチ K を軽く押し、検流計の振れが (iii) の場合と反対向きであることを確かめる。もし同じ方向に振れるならば配線に問題があるので点検すること。

(v)

(iii) と (iv) のそれぞれの場合の検流計の振れが反対になることを確かめた後、S の抵抗値を様々に変えて検流計の振れを見る。このとき、振れが (iv) と同じ方向ならば、 $S > R$ であり、逆方向ならば $S < R$ である。

振れの方角を調べながら、振れが小さくなるように S を選んでいく。振れが小さくなったところで分流器を外して上記の操作を繰り返す。このとき、スイッチの接触は瞬間的に行うように注意する。

このようにして、振れを最小にする S を求め、 S から R (この場合は $S = R$) の値を求める。

(vi)

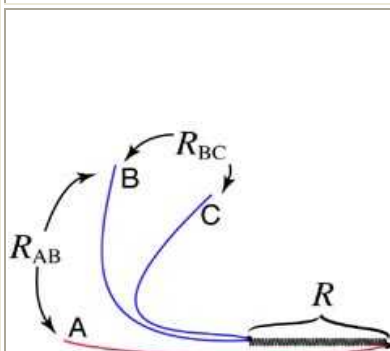
次に、 $P / Q = 10 / 100$ (例えば $P = 100$ 、 $Q = 1 \text{ k}$) となるように P と Q を選び、 S の値を(v)で求めた約 10 倍にして、(v)と同様の操作を行い、再び振れを最小とする S を求める。この S の値から

$$R = \frac{P}{Q} \times S = \frac{1}{10} S$$

より R を求める。このようにして得られた R の値は(v)で得られた値より 1 桁精度が高くなる。

(vii)

さらに、 $P / Q = 1 / 100$ (例えば $P = 10$ 、 $Q = 1 \text{ k}$) となるように P と Q を選んで、同様の操作を行い、さらに 1 桁多い R の値を求める。このとき、 R が 2 つの S の間にあるときは、検流計の左右の振れの大きさに比例配分して値をきめる。



(viii)

このようにして求められた抵抗 R は、試料(銅線)とリード線の抵抗の和 R_{AB} である。そこで、リード線の先端 B, C 間の抵抗を、A, B 間と同様に測定して、B, C 間の抵抗 R_{BC} を求める。

R_{AB} から R_{BC} を差し引き、試料の真の抵抗 $R (= R_{AB} - R_{BC})$ を求める。

(ix)

室温での測定が終わったら、過熱水槽中にサンプルをいれ、スライダックを“STOP”(赤印)までまわした状態で、攪拌棒で攪拌しながら水槽の水を過熱する。

(x)

昇温しながら R_{AB} の温度変化を測定する。(小数点以下 2 桁まで)

上記(vi) ~ (vii)の要領により、数分間隔(できるだけ頻繁に)で R_{AB} を素

早く測定する。

抵抗値が確定したら、その瞬間にパソコンのモニタに表示されている、最新の温度を読んで記録する。

(xi)

抵抗測定は室温から 80 度付近まで行う。

測定が終了したら、スライダックを 0 まで戻し、コンセントを抜く。

試料のリード線を、ブリッジ回路から外す。

半導体の抵抗測定に備えて、過熱水槽の水を交換する。(やけどをしないように注意して下さい。)

C. 半導体の抵抗測定

(i)

水槽の水を入れ替え、サーミスターの試料が入っている試験管を水槽のふたに取り付ける。

試料の両端に取り付けられたリード線を銅線の試料と付け替える。

(ii)

銅線の場合と同様の手順で、室温から 80 °C 付近まで 数分おきに(できるだけ頻繁に)測定する。

P および Q は $P = Q = 1000$ に選んで測定する。

また、サーミスターの抵抗の変化は、銅線に比べてとても激しいため、抵抗値の最小桁は読み取るのが困難である。

特に 50 ° 付近までは測定中にも抵抗値が大きく動いてしまうので、無理をして最小の桁まで読み取る必要はない。

5. データの整理

A. 金属抵抗の結果

9	49.62	6.22
10	51.79	6.25
11	54.63	6.32
12	56.77	6.36
13	59.03	6.42
14	61.61	6.49
15	63.92	6.53
16	65.49	6.55
17	67.76	6.59
18	70.21	6.65
19	72.73	6.71
20	74.78	6.76
21	77.73	6.84

(i)

デスクトップにある Origin のアイコンをダブルクリックして起動し、ノートに記録した温度と抵抗値の結果をワークシート(表)に

A カラム: 温度 (°C)

B カラム: 抵抗 R_{AB} ()

のように手で打ち込む。



	A(X)	B(Y)
1	24.06	5.65
2	26.98	5.7
3	27.86	5.76
4	31.64	5.83
5	34.54	5.88
6	40.71	6.01
7	42.87	6.05
8	45.67	6.13
9	49.62	6.22
10	51.79	6.25
11	54.63	6.32
12	56.77	6.36
13	59.03	6.42
14	61.61	6.49
15	63.92	6.53

(ii)

ワークシート(表)の余白を右クリックして“新しい列の追加”を選択してカラム C を追加する。



	A(X)	B(Y)
5		
7		
6		
3		
8		
1		
5		
3		
2		
5		
2		
6		

(iii)

カラム C のタイトル部分(左図の黄緑のマーカ部分)を右クリックして、ポップアップメニューから“列値の設定...”を選択する。



(iv)

カラム C には R_{AB} からリード線の部分の抵抗を差し引いた結果を入れる。

そのため、列の値は左の図のように $Col(B) - R_{BC}$ とする。 (R_{BC} にはもちろん実測値を入れること。)

	A(M)	B(M)	C(M)
1	24.06	5.65	5.49
2	26.98	5.7	5.54
3	27.86	5.76	5.6
4	31.64	5.83	5.67
5	34.54	5.88	5.72
6	40.71	6.01	5.85
7	42.87	6.05	5.89
8	45.67	6.13	5.97

(v)

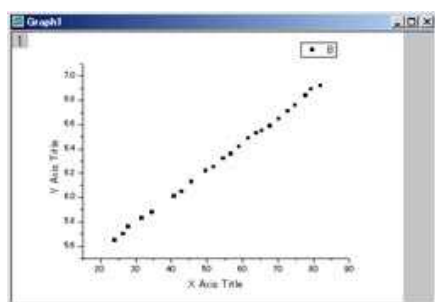
カラム A と C を Control キー (キートップは“Ctrl”となっています) を押しながらカラム A とカラム C のタイトル部分をクリックして図のように選択する。



(vi)

画面下のツールバーの左から 2 つめのボタンをクリックして、グラフを作成する。

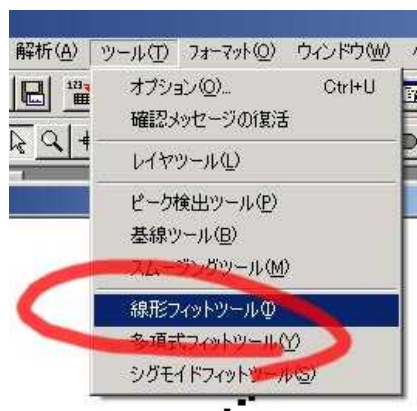
これが表示されていない場合は、“表示”メニュー > “ツールバー”を選択して、“2D グラフギャラリー”にチェックを入れて下さい。



(vii)

作成したグラフの例。

測定温度範囲ではほぼ直線上に乗ることが分かる。



(viii)

上の結果を最小二乗法により, 1 次関数

$$Y = A + B \cdot X$$

にフィットする.

“ツール”メニューから“線形フィットツール”を選択する.



(ix)

左のような“線形フィット”の設定画面が現れる.

“設定”タブを選択して, 図のように“X軸全範囲で作図”にチェックを入れる.

“操作”タブに切り替えて“フィット”ボタンをクリックすれば, フィッティングが実行される.

(x)

フィッティング結果は, “結果ログ”ウィンドウに現れる.



Y 切片と傾きから

$$R(t) = R(0) (1 + \quad t)$$


の $R(0)$ と \quad を求め, 実験式を完成させる.

$R(0)$ は 線径と長さ から, 抵抗率に換算して理科年表の値と比較する.

グラフは横軸を 0°C から 100°C までとり, 表題と軸タイトルを付けて

完成させること。

B. 半導体（サーミスター）の抵抗測定の結果



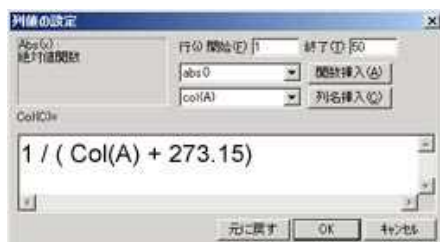
	A(X)	B(Y)
35	78.98	349
36	80.78	331
37	82.27	318
38	83.76	306
39	84.54	299
40	85.42	291
41	86.76	281
42	88.66	269
43	89.87	259

(i)

銅線の場合と同じように、温度と抵抗値をそれぞれカラム A とカラム B に手打ちで入力する。

先ほどと同じように、カラム A, B を選択して、グラフを作成する。(R [] v.s. t [°C] のグラフ)

作成されたグラフに表題や、軸ラベルを入力して **グラフを完成させる**。これはテキストのグラフ (図 8-9) に該当する。



(ii)

最終的に求めたいのは“抵抗値”と“絶対温度の逆数”の関係である。

カラム C と D を追加する。(表の余白で右クリックして、“新しい列を追加”を 2 回繰り返す。)

測定温度を絶対温度に変換し、その逆数をカラム C にいれる。(カラム C の“列値の設定”で左の図のような計算を行えば良い。)



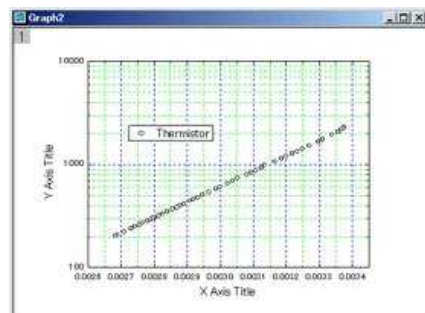
また、カラム B の抵抗値のデータを選択したうえでコピーし、カラム D にペーストする。



(v)

(vi)

このグラフを片対数グラフにするため、縦軸(垂直方向)の“スケールタイプ”を“常用対数”に変える。

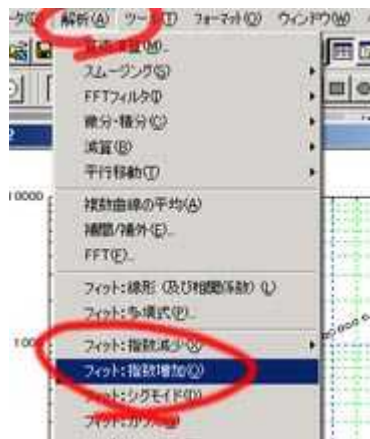


(vii)

片対数グラフにデータをプロットした結果が右図である。

データが直線上に乗ることから、このデータがX軸に関して指数関数的にふるまっていることが分かる。

(なぜそう言えるのでしょうか？)



(viii)

この実験データをテキストの実験式 (8-15) 式

$$R(t) = R(\infty) \exp \left(\frac{Q}{k_B T} \right)$$

(k_B はボルツマン定数)

に当てはめるために $R()$ および活性化エネルギー Q をフィッティングにより求める。

“解析” “フィット: 指数増加”を選択する。

これはデータを

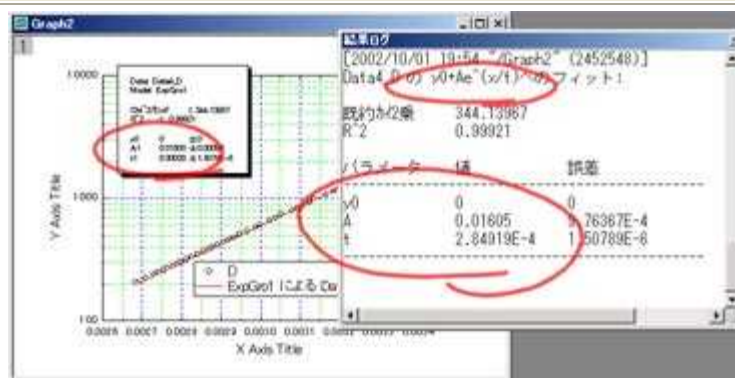
$$y = y_0 + A \exp \left(\frac{x}{t} \right)$$

にフィットするコマンドである。従って出てきた結果には

$$A = R()$$

$$t = k_B / Q$$

の関係がある。



(x)

上の図がフィッティング結果．“結果ログ”を参照して R () および活性化エネルギー Q を求める．

軸のスケール調節，軸ラベルやグラフの表題の入力を行って，グラフを完成させて下さい．

(xi)

以上で終了です．お疲れ様でした．

6. 実験上の注意点

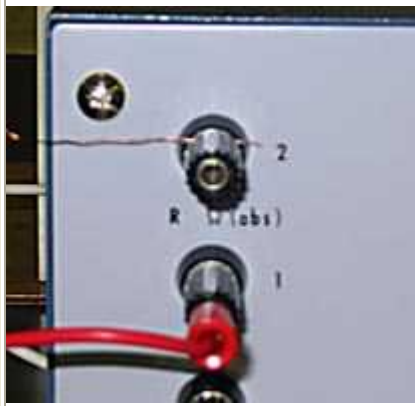
A. 結線をする際の注意

(i)

金属抵抗と半導体抵抗の両方の試料とも，リード線には絶縁のための塗装被覆がついています．

端子につける部分の被覆が良くはがれていないと，電気的な接触がうまくとれないことがあります．このことによって，ブリッジ回路がうまく働かないことがあるため，接続前にはリード線の先端を見て，被覆がはがれているか確かめて下さい．

もし被覆のはく離が不完全な場合には、紙やすりで磨いて下さい。(紙やすりは実験室前方、ホワイトボードのそばにあります。自由に持って行って下さい。)



(ii)

リード線を端子に繋ぐときは、左の写真の上の端子のように、リード線の磨かれた部分が挟まれるように接続して下さい。

バナナクリップに巻き付けたりするだけでは、まともな接触は期待できません。

(iii)

おそらく間違える人はいないと思いますが、ブリッジ回路の電源には乾電池を使用して下さい。

過去に実際にあった事故ですが、ヒーター用のスライダックに接続した人がいました。確実に検流計を壊しますし、**なによりも危険なので絶対に間違えないで下さい。**