

# 9

## 熱起電力

熱起電力の実験へようこそ．

本実験では，熱電対の一種である銅-コンスタンタン熱電対を使用して，熱起電力現象を観察します．

熱電対は，その構造の簡単さのために温度計，あるいは温度差センサーとして（主に小型化が要求される場面で）幅広く利用されています．

そのため，この実験では銅-コンスタンタン熱電対を温度計として利用できるようにするために，温度 - 熱起電力の関係を求めることを最終目標としています．

また，実験の中で錫（すず）と鉛の融解および凝固の際の温度変化や過冷却現象の振る舞いを観察します．

このテキストは，実験の具体的な進め方やコンピューターを利用した実験結果の整理の仕方などをまとめたものです．コンピューターの操作方法等に疑問を感じたら，インストラクターに質問する前に，まず左側のリンクから（[測定の手順](#)）あるいは（[結果の整理](#)）の項目を参照して下さい．

**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ください．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）にしてください．**

実験データやグラフを保存する際には，必ず上記で作成したフォルダに入れて下さい．

## 2. 実験の概要

---

基礎物理学実験では 2002 年度より、コンピュータを測定およびデータ解析に活用してもらうために全面的に導入しました。これは、現在の研究の現場で行われている実験スタイルに、より近い状態で履修してもらうことを目的としています。

個々の実験時間は限られたものですので、ソフトウェアの使用方法などを一貫して教えるということではできません。むしろ“この場合はこうやって。”という対症療法的な教え方に終始すると思います（使用方法を学ぶのは本来の目的ではないため）。いろいろな実験でさまざまな使い方をするうちに慣れてくるとと思いますので、積極的に利用して下さい。

本実験も 2001 年度までは、熱電対の発生する起電力を電圧計で計り、それを一定時間間隔でノートに記録してもらっていました（[すず、鉛の冷却曲線](#)を参照のこと）。2002 年度からは熱起電力をデジタルマルチメータでデジタイズしてパソコンに取り込むように変更されています。測定時間が数時間に及ぶこの実験では、自動計測の恩恵を最も感じることができると思います。

実験の概要は以下の通りです。

1. 冷接点の準備、熱電対、マルチメータのチェックと配線
2. 蒸留水の沸点、液体窒素の沸点での熱起電力の測定
3. すず、鉛の融解および凝固の過程での熱起電力の測定。  
(2 番と 3 番は入れ替え可能です。)
4. 実験結果から熱起電力と温度の関係を求める。

具体的なやり方は左側のリンクから[測定の手順](#)および[結果の整理](#)を参照して下さい。

---

### 3. 実験装置

	<p><b>銅-コンスタンタン熱電対</b></p> <p>この実験で性質を調べる銅-コンスタンタン（銅-ニッケルの合金）熱電対です。</p> <p>おおまかな使用温度範囲は-200 °C ~ 350 °C です。</p> <p>先端部（赤丸の部分）はアーク溶接により溶接されています。</p> <p>実験を始める前にこの部分を見て、ちゃんと繋がっているかチェックして下さい。</p>
	<p><b>沸騰容器</b></p> <p>水の沸点での熱起電力を測定する際に使用します。</p> <p>水蒸気の圧力を計る圧力計（横に付いている U 字型のガラス管のことです。）および熱電対を差し込むためのガラス管の付いたふたとで構成されています。</p>
	<p><b>電気炉</b></p> <p>すずや鉛を融解点まで昇温するのに用います。写真に写っているのは電気炉に流す電流を調節する電源装置です。</p>



### 冷接点容器

内側にガラス製の魔法瓶が入っています。

使用時には中に氷水を入れ  $0^{\circ}\text{C}$  の基準点とします。

ふたには、熱電対を接続する端子 (CU および CON) が設けられています。



### デジタルマルチメーター

直流および交流の、電圧、電流および抵抗測定ができます。

本実験では熱起電力 (直流電圧) の測定に使用します。

配線は左の写真のように行ってください。

パソコンに入っているソフトウェアで測定および制御を行いますので、この装置のパネルを直接操作する必要はありません。

## 4. 実験手順

### A. 起電力の測定方法



(i)

熱電対に働く起電力は、デジタルマルチメーターで測定します。  
メーターに接続するのは熱電対の銅線側と氷水を入れた魔法瓶から来るリード線です。

接続する端子は、左の写真を参照して差し込んで下さい。



熱電対の基準点には氷水を使用します。

氷は実験準備室(インストラクターの人達の控え室)に製氷機がありますので、測定を始める前に魔法瓶を持って氷を取りにいて下さい。



(iii)

実験の時間中に氷が全て融けてしまわないように、氷は多めに入れて下さい。写真のように魔法瓶の縁まで入れるようにします。



(iv)

実験室中央に置いてあるタンクから蒸留水を魔法瓶に注ぎ足して氷水を作ってください。水を入れないと出力される熱起電力が不安定になります。



(v)

魔法瓶側の配線は写真の通りです。マルチメーターと“CU”端子をリード線で繋ぎ、熱電対のコンスタンタン線を“CON”端子に繋いで下さい。

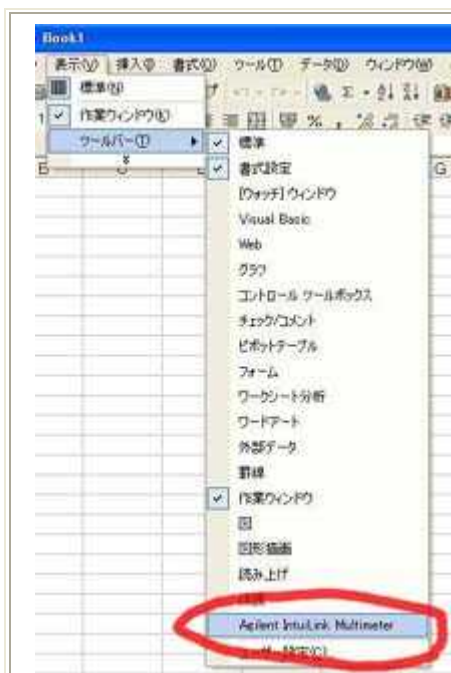


(vi)

氷水を作って、魔法瓶とマルチメーターの間の配線が終わったら、メーターの電源を入れて下さい。

コンピューターを起動して、デスクトップにある“Excel IntuiLink アドオン”のアイコンをダブルクリックして起動して下さい。

Microsoft Excel とともに左図のようなツールバーが現れます。



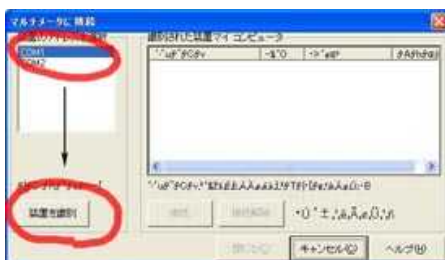
(vii)

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、表示されます。



(viii)

ツールバー左端のボタン (“マルチメーターに接続”) をクリックして下さい。



(ix)

すると、左のような“マルチメーターに接続”ダイアログボックスが現れます。

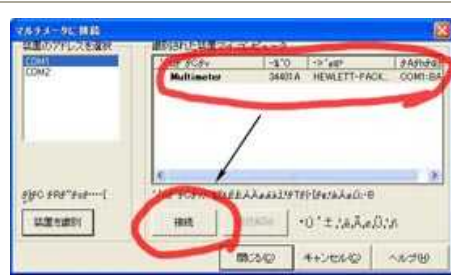
左側の“装置のアドレスを選択”欄で COM1 を選んで、下の“装置を識別”ボタンをクリックして下さい。



(x)

左図のような、マルチメーター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 ボタンをクリックして下さい。





(xi)

右側のリストに、接続されているマルチメーター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して下さい。



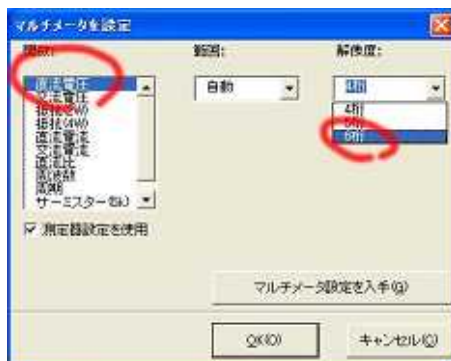
(xii)

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ます。これを確認したらこのダイアログボックスを閉じて下さい。



(xiii)

次に左から3番目のボタンをクリックして下さい。ここでマルチメータの設定を行います。

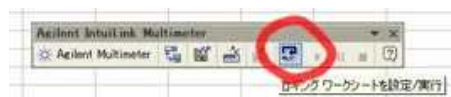


(xiv)

測定するモードは直流電圧なので、“関数”(function: “機能”の誤訳か)から“直流電圧”を選択して下さい。

“範囲”(測定レンジの意味だと思います。)は自動にしておいて下さい。


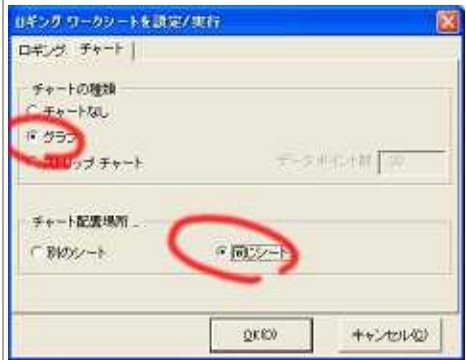
解像度は、最大の6桁に設定しておいて下さい。OK ボタンをクリックして次に進んで下さい。



(xv)

起電力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つ目)のボタンをクリックして下さい。



	<p>(xvi)</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します。</p> <p>測定間隔は、5 秒間隔に設定すれば十分です。</p> <p>“測定時間”は2 時間以上に設定して下さい。</p> <p>次に、チャートタブ(左図の青いマーカー)をクリックして、ワークシート上に表示されるグラフの設定を行います。</p>
	<p>(xvii)</p> <p>“チャート”タブでは、左図の赤丸で印を付けた 2 箇所のラジオボタンを選択して下さい。</p> <p>チャートの種類: グラフ</p> <p>チャートの配置場所: 同じシート(グラフが表示されない場合は大抵ここを選び忘れていきます。)</p> <p>OK ボタンをクリックすると測定が開始されます。</p>

## B. すず，鉛の凝固点の測定



(i)

すず (Sn) と鉛 (Pb) の試料は磁製の試験管に入っています。電気炉が熱を持っている際には、左の写真のように火ばさみ(?)を使って出し入れして下さい。



(ii)

ふたに付いている穴から、熱電対を差し込む管が飛び出すようにふたを閉めて下さい。



(iii)

熱電対の先端を細い磁製管の底までしっかり差し込んで下さい。  
熱起電力の実験は、比較的失敗の出にくい実験ですが、ここで熱電対の入れ方が浅いことによる失敗が一番多く見受けられますので注意して下さい。



(iv)

電気炉の電源のコンセントを入れて、温度設定つまみを電源の前面に張り付けてある設定温度(あるいはそれよりも2 ~ 30 °C 高め)に設定して下さい。



(v)

電源左側に付いているスライダックを回してまん中に付いている電流計の値が約 6A になるまで上げて下さい。

電流を流しはじめたら“ [起電力の測定法](#)”を参照の上、Excel で“ロギングワークシートの実行”をおこなって、起電力の時間変化を測定しはじめて下さい。

(vi)

起電力の上昇が鈍ってきたら (Excel のワークシート上のグラフを注意して見て下さい。) 試料が融解してきています。電気炉の温度が上がり過ぎないようにするために、**この時点で電気炉に電流を流すのを止めて下さい。**

スライダックをゼロに戻すか、設定温度を下げれば電流は止まります。

(vii)

すず、鉛のどちらの場合でも熱起電力は、凝固点付近でしばらく一定になります。だいたいの目安は

すず： 10.8 mV

鉛： 16.2 mV

です。一定の値をとった後で、下がり始めるのを確認したら測定を終了して次の実験に移して下さい。ワークシートに記録されたデータは後で使いますので、“マイドキュメント”フォルダ内に作成した今日の日付けのフォルダに（作成していなければ作成して）**保存して下さい。**

---

### C. 水，液体窒素の沸点の測定



(i)

沸騰容器に蒸留水を入れて下さい。  
容器の内側は2重になっていますので、内側の方に水を注いで下さい。



(ii)

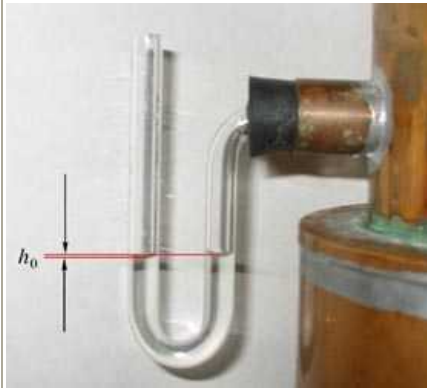
水をいれ過ぎると沸騰した際に突沸するなど危険なので、注意して下さい。

容器の下の太い部分(左の写真)の8分目位を目安にして下さい。



(iii)

沸騰容器内部の蒸気圧を測定するために、左の写真のような、U-字型のガラス管に水道水を入れて沸騰容器に取り付けます。

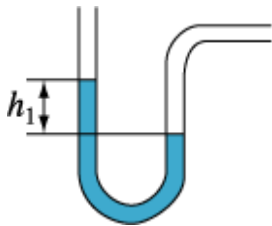


(iv)

沸騰容器に取り付けたら、水をあたため始める前にあらかじめ左の図のように水中の高さの差  $h_0$  をはかっておいて下さい。

左の写真の場合(ちょっと分かりづらいですが、)沸騰容器側の方が水面が高くなっています。この場合  $h_0$  は負の値になります。

この値をノートに記録したら、熱電対を容器のふたのガラス管に差し込んで、水をあたため始めて下さい。



(v)

容器の水が沸騰して、出力される熱起電力が安定したら、その値を記録して下さい。そして上と同じようにU字管の水面の高さの差  $h_1$  を計って下さい。

$$P = H + \frac{h_1 - h_0}{13.6} [\text{mmHg}]$$

より求まる  $P$  が容器内部の圧力になります。ここで  $H$  は大気圧です。(別に計っておいて下さい。)

(vi)

上で求めた  $P$  を用いて水の沸点を

$$T_{\text{F}} = 100.00 + 0.0367 (P - 760) [^{\circ}\text{C}]$$

により求めて下さい。



(vii)

上の実験あるいは、鉛や錫の実験の合間にでも良いので、液体窒素中に熱電対を浸して起電力を測定しておいて下さい。すぐに終わります。

液体窒素の沸点は、  
**-197.75 °C**  
 です。

水の氷点よりも低いため、起電力も負の値になります。

## 5. 実験結果の整理

### A. 冷却曲線のグラフの描画

	A	B	C	D
1	時間	VDC		間隔
2	10:30:21.0	0.017043	0	
3	10:30:26.0	0.017027	5	サン
4	10:30:31.0	0.01701	10	サン
5	10:30:36.0	0.016994		
6	10:30:41.0	0.016978		
7	10:30:46.0	0.016962		
8	10:30:51.0	0.016946		
9	10:30:56.0	0.016929		
10	10:31:01.0	0.016913		

(i)

ずっと鉛の冷却曲線の実験で保存しておいた、ワークシートを開いて下さい。

列 C に実験を開始してからの経過時間を表すデータを作成します。測定間隔は 5 秒に設定してあるので、左の図のように

0, 5, 10

と打ち込んで下さい。



Microsoft Excel - Sn\_coolingcurve.xls

ファイル(F) 編集(E) 表示(V) 挿入(I) 書式(O) ツール

MS Pゴシック 11

C2

	A	B	C	D
1	時間	VDC		
2	103021.0	0.017043	0	間
3	103026.0	0.017027	5	サ
4	103031.0	0.01701	10	サ
5	103036.0	0.016994		
6	103041.0	0.016978		
7	103046.0	0.016962		

(ii)

上で打ち込んだ数字を、マウスをドラッグして左の図のように選択して下さい。

fx 0

	C	D
7043	0	
7027	5	
1701	10	
3994		
3978		
3962		
3946		
3929		
3914		
3898		
3882		
3866		
1685		
3834		
3818		
3802		
3786		
1677		
3754		
3738		
3721		
3705		

つかんで  
下方へドラッグ

(iii)

選択領域の右下のコーナーに小さい黒色の四角形(ハンドルと呼ばれることが多い)があると思います。

これをマウスで掴んで下方向へドラッグして下さい。

ドラッグした範囲には自動的に5ずつ増加する等差数列が入力されます。

fx 0

	A	B	C	D	E
881	114336.0	0.010132	4395		
882	114341.0	0.010111	4400		
883	114346.0	0.01009	4405		
884	114351.0	0.01007	4410		
885	114356.0	0.010049	4415		
886	114401.0	0.01003	4420		
887	114406.0	0.01001	4425		
888	114411.0	0.009991	4430		
889	114416.0	0.009971	4435		
890	114421.0	0.009952	4440		
891	114426.0	0.009933	4445		
892	114431.0	0.009915	4450		
893	114436.0	0.009897	4455		
894	114441.0	0.009870	4460		
895	114446.0	0.009861	4465		
896	114451.0	0.009843	4470		
897	114456.0	0.009825	4475		
898	114501.0	0.009808	4480		
899	114506.0	0.009791	4485		
900	114511.0	0.009774	4490		
901					

ここまで

(iv)

これをデータの終点まで、ドラッグして下さい。



そのうえで、列 C と D をドラッグして選択し、コピーして Origin に持っていきます。



画面下方のツールバーのボタン(左図参照)をクリックして、冷却曲線のグラフを作成します。



カーソル移動キー(矢印キー)でデータリーダーを左右に動かして、ずすと鉛の凝固点での熱起電力を求めて下さい。

B. 熱起電力と温度の関係を求める．



	A(X)	B(Y)
1	-195.75	-5.55
2	100.42	4.264
3	231.191	10.9
4	327.5	16.239
5		
6		
7		

(i)

まず，実験で求めた起電力から，  
縦軸が  $E / T [\text{mV} / ^\circ \text{C}]$   
横軸が  $T [^\circ \text{C}]$

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ます．  
出てきたワークシートのカラム A に  
(液体窒素，水の沸点，錫と鉛の凝固  
点)を入力する．カラム B にはそれぞ  
れについて測定された熱起電力を入  
力する．



	A(X)	B(Y)
1	-195.75	-5.55
2	100.42	4.264
3	231.191	10.9
4	327.5	16.239
5		
6		
7		

(ii)

ワークシート(表)の余白を右クリック  
すると，左図のようなメニューが現れ  
ますので，“新しい列を追加”を選択し  
て新たにカラム C を追加して下さい．



	A(X)	B(Y)	C(Y)
1	-195.75	-5.55	
2	100.42	4.264	
3	231.191	10.9	
4	327.5	16.239	
5			
6			
7			

(iii)

追加したカラム C のタイトル部分  
 (“C(Y)”と書いてある部分)を右クリッ  
クして現れるメニューから，左図のよ  
うに“列値の設定...”を選択しま  
す．



(iv)

このカラム C には熱起電力  $E$  [mV] を温度  $T$  [°C] で割った値を入力したいので、  
左図のように計算式  
 $\text{Col(B)} / \text{Col(A)}$   
を列 C の値として入れます。



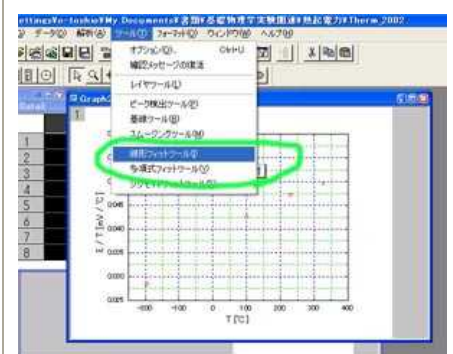
(v)

列 C を Y 軸に、列 A を X 軸にグラフを書きます。

ワークシート上で、コントロールキー (“Ctrl”と書いてある左あるいは右下隅のキー) を押しながら、列 A と列 C を選択して下さい。



そして、画面下のツールバーから左の図のボタンをクリックすると、 $E / T$  のグラフが書けます。



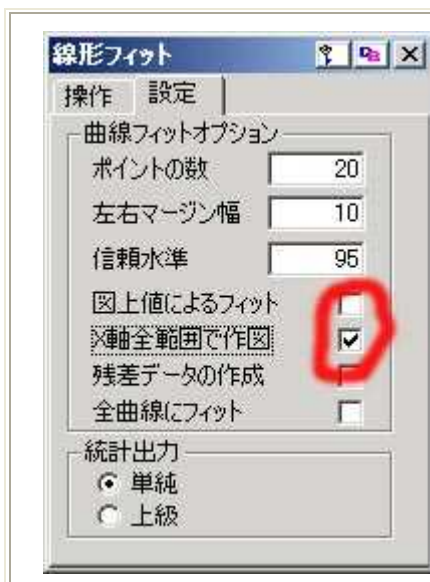
(vi)

上で作成したグラフを式

$$\frac{E}{T} = \alpha_{AB} + \frac{1}{2} \beta_{AB} T$$

にフィットすることによって、 $\alpha_{AB}$  および  $\beta_{AB}$  を求めます。

そのために、“ツール”メニュー “線形フィット”を選択して下さい。



(vii)

左の設定画面(“設定”タブをクリックした状態)では“X 軸全範囲で作図”をチェックして下さい。



(viii)

“操作”タブをクリックして、下の“フィット”ボタンをクリックすれば線形フィットが開始されます。



(ix)

フィッティング結果は“結果ログ”ウィンドウに表示されます。

ここで使用したツールではフィッティング関数として、1 次関数

$$Y = A + B * X$$

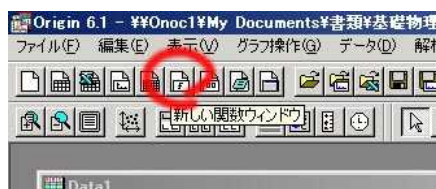
を使用しています。そのため と

は

$$= A ,$$

$$= B * 2$$

として求められます。



(x)

最後に、温度と熱電対の起電力の関係を表すグラフを作成して下さい。

具体的には以下の関数

$$E_{\text{A.R}} = \alpha_{\text{A.R}} \cdot T + \frac{1}{2} \beta_{\text{A.R}} T^2$$

の計算結果をグラフ表示する、ということです。

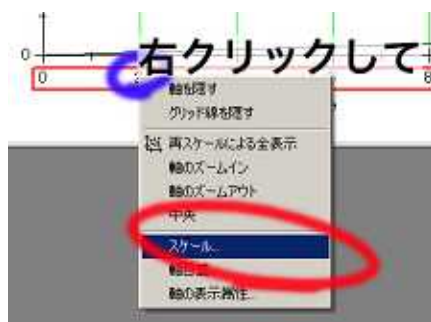
関数を直接(データを生成せずに)グラフに書きたいときは、左図の赤丸に示した“新しい関数ウィンドウ”のツールボタンをクリックします。



(xi)

関数の定義を促す画面が現れますので、上の2次関数(あるいはテキストの(9-1)式)を打ち込んで下さい。(左の図のaや、bには(v)で求めた係数を入れて下さい。)

上の式を入力するためには  
 $a * x + b / 2 * x^2$   
 とキーボードから入力します。



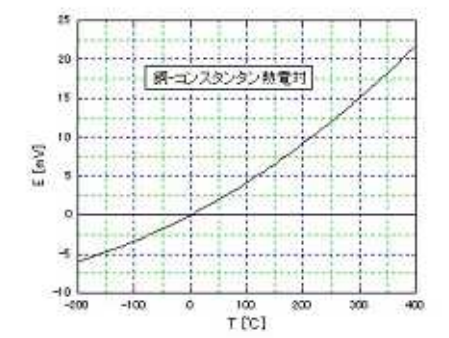


(xii)

関数グラフの初期設定では、横軸が0～10までになっています。熱電対の測定温度範囲は-200 °C～350 °Cであるので、その範囲をカバーするようにスケールを変更して下さい。

スケールの変更は、左の図のようにx軸上の数字を右クリックして、ポップアップメニューから“スケール...”を



	<p>選択して下さい。</p>
	<p>(xiii)</p> <p>すると、左の図のようなグラフの描画範囲を設定する画面が現れるので、</p> <p>-200 ~ 400 (きりのいいところで)</p> <p>と x 軸の範囲を設定する。</p>
	<p>(xiv)</p> <p>Y 軸の範囲も同様にして変更してください。 -10 ~ 20 (mV) 程度でいいでしょう。</p>
	<p>(xv)</p> <p>軸ラベルや表題を付けて、グラフを完成させて下さい。</p>
<p>(xvi)</p> <p>以上で終了です。お疲れ様でした。</p>	

## 6. 実験上の注意点

---

手順のところにも書いたことですが、今まで見受けられた失敗例は以下のようなものです。

1. 配線間違い。
2. 冷接点に氷だけ入れて、蒸留水を入れていない。
3. 冷接点に入れる氷が少なすぎて、測定中に温度が上がってしまう。
4. すず、鉛の凝固点を測定する際に、熱電対の差し込み方が不十分。

この実験では、400 度の高温からマイナス 200 度の低温まで扱う実験です。

やけど(液体窒素による低温やけども含む)には十分気を付けて下さい。

---