

基礎デジタル計測

Basics of digital measurements

提出者：08A17153 羽田充宏
共同実験者：08A17152 能登健太

実験実施日：2019年7月5日

実験実施日：2019年7月8日

実験実施日：2019年7月12日

実験実施日：2019年7月19日

実験実施日：2019年7月22日

実験実施日：2019年7月26日

Introduction

金属や半導体の電気特性を調べる際に電気抵抗を測定することは非常に有効である．この実験での目的は電気抵抗の温度依存性，様々な金属の電流電圧特性を計測することで金属，半導体の電気特性を調べることである．

1 Comparison between two- and four-terminal measurements(1st day)

1.1 Purpose

低抵抗サンプルを 4 端子測定法と 2 端子測定法によって抵抗測定をしてその違いについて考える．

1.2 Procedure

抵抗 (10 Ω, 50 Ω, 1k Ω) と直径の異なる二つの銅線 (0.1mm, 0.122mm) に電流を流し電圧計，電流計を用いて 4 端子測定法，2 端子測定法によりその抵抗を測定をし，その違いについて考える．

また金属の抵抗値，抵抗率の関係は以下の数式によって定義されている．

$$R = \rho \frac{l}{S} (\Omega) \quad (1)$$

この関係式に今回の実験条件の ($l = 1\text{cm}$), 断面積 S , 測定抵抗 R を代入する事により銅の抵抗率を求めた．また 4 端子測定法，2 端子測定法はサンプルに対して以下のように計測器をつなぐ．

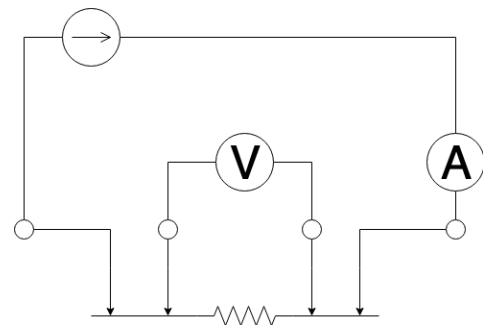


図 1: 4 端子測定法

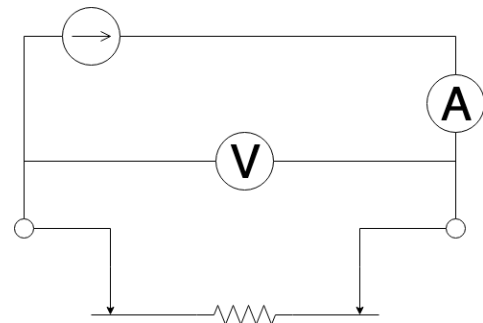


図 2: 2 端子測定法

1.3 Result

測定の結果電流電圧の関係をプロットすると以下のようなグラフが得られた．

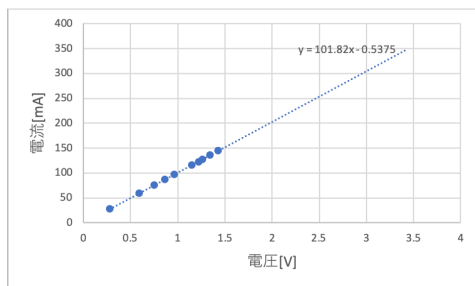


図 3: 4 端子 10Ω

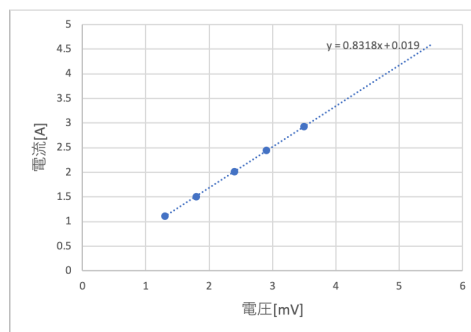


図 6: 4 端子 0.1mm 銅線

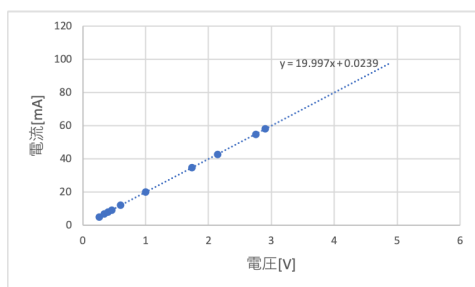


図 4: 4 端子 50Ω

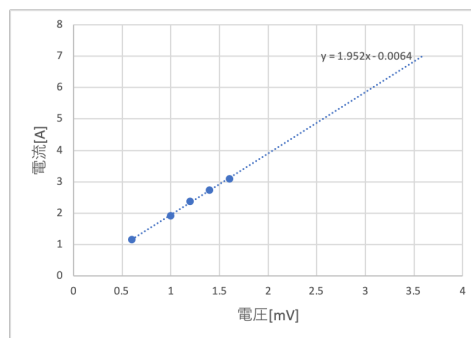


図 7: 4 端子 0.122mm 銅線

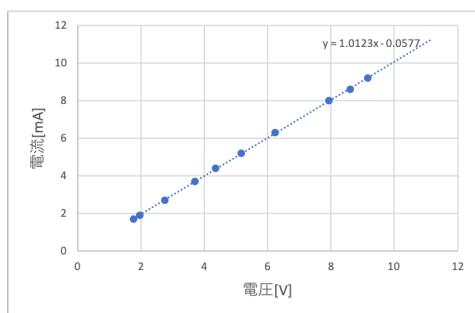


図 5: 4 端子 1kΩ

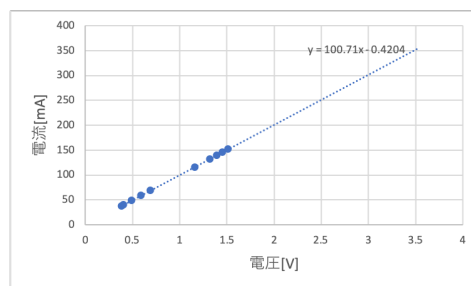


図 8: 2 端子 10Ω

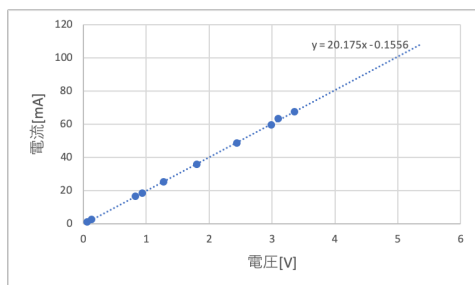


図 9: 2 端子 50Ω

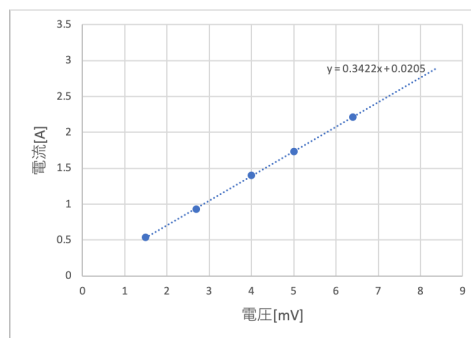


図 12: 2 端子 0.122mm 銅線

以上の結果よりグラフの傾きを最小二乗法によって求めそれぞれの抵抗値を求めたところ表 1 のようになった。

またそれぞれの場合において抵抗率は表 2 のようになった。

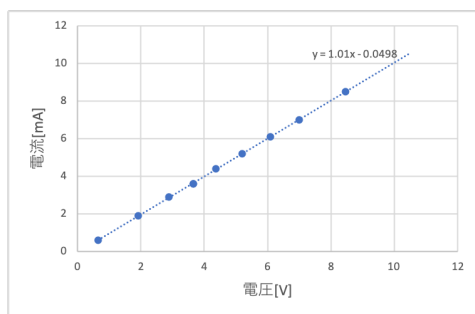


図 10: 2 端子 1kΩ

表 1: 抵抗値 (Ω)

	4 端子	2 端子
10Ω	9.821	9.930
50Ω	50.01	49.57
1kΩ	987.8	990.1
0.1mm 銅線	0.001202	4921
0.122mm 銅線	0.0005123	2922

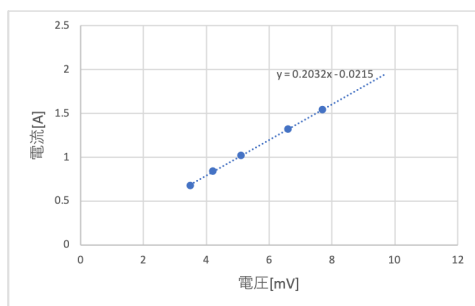


図 11: 2 端子 0.1mm 銅線

表 2: 抵抗値 (μΩcm)

	4 端子	2 端子
0.1mm 銅線	0.0944	0.387
0.122mm 銅線	0.0599	0.342

1.4 Discussion

まず四端子測定法と二端子測定法の違いについて考察する。図 13, 図 14 にそれぞれの回路図

を示す．ここで R_A は電流計の内部抵抗， R_s はサンプル抵抗， r_1, r_2, r_3, r_4 は測定回路における接触抵抗およびリード線の抵抗とする．また電圧計の内部抵抗は十分に大きいものとして抵抗値無限大を考える．

二端子測定法の場合

この時電流計の内部抵抗 R_A の値は測定には影響を与えないため考慮しない事にする．また電圧計の抵抗は無限大としているため電圧計に流れる電流は 0 とみなす．すると測定電圧 V ，測定電流 A の関係は次のようになる．

$$\frac{V}{I} = r_1 + r_2 + R_s \quad (2)$$

四端子測定法の場合

この時も同様に電圧計の内部抵抗は十分に大きいと言えるので電圧計に流れる電流は無視できる．すると測定電圧と測定電流の関係は次のように表せる．

$$\frac{V}{I} = R_s \quad (3)$$

以上の考察より二端子測定法ではサンプル抵抗と同様に余計な抵抗 r_3, r_4 を測定してしまうためサンプル抵抗が小さい場合の測定方法には適していないと考えられる．

接触抵抗およびリード線の抵抗が 100Ω と考えれば $10k\Omega$ より大きいサンプル抵抗を測定する際には誤差を 1%以内に抑えることができると予想される．

今回の場合は測定する抵抗値は比較的小さいので四端子測定法で測定する方が望ましいと考えられる．また二端子測定法は四端子測定法に比べて余分な接触抵抗まで測定してしまうので四端子測定に比べて測定抵抗値が大きく表示されてしまうと考えられる．実際表 1 においていずれの場合も二端子測定法で測定を行った方が抵抗値が高く測定されたのでこの考えは正しいと予想できる．

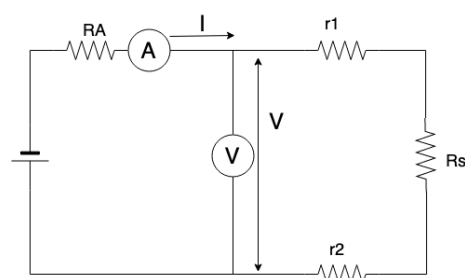


図 13: 二端子測定法

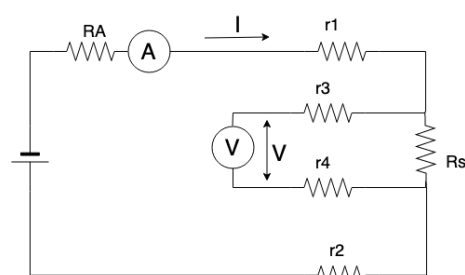


図 14: 四端子測定法

2 Measure of the resistivity(2nd day)

2.1 Purpose

金属の電流電圧特性を測定する．

2.2 Procedure

4 端子測定法により以下に示す試料の抵抗を求める．測定した抵抗値から試料の長さ，直径を考慮してそれぞれの試料の抵抗率を求める．また今回の測定は全て $l = 1\text{cm}$ の幅で行った．

- A copper wire
- A NiCr wire
- A tungsten wire

- A lead of automatic pencil(H,2B)
- A Ni wire
- An Ag wire
- An unknown sample

2.3 Result

測定の結果電流電圧の関係をプロットすると以下のようなグラフが得られた。

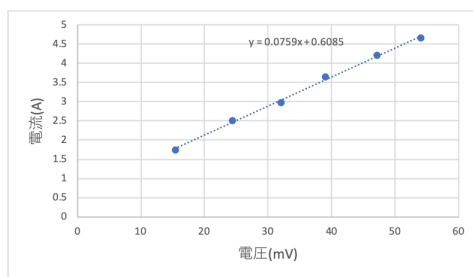


図 15: Cu

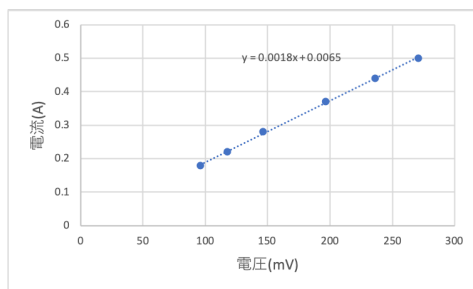


図 16: NiCr

以上の結果よりグラフの傾きを最小二乗法によって求めそれぞれの抵抗値, 抵抗率を求めたところ以下の表のようになった。

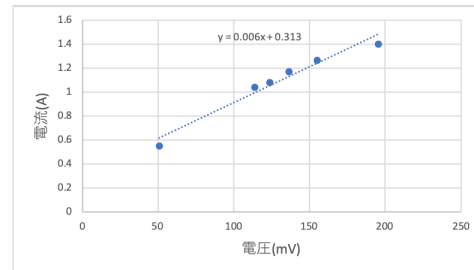


図 17: W

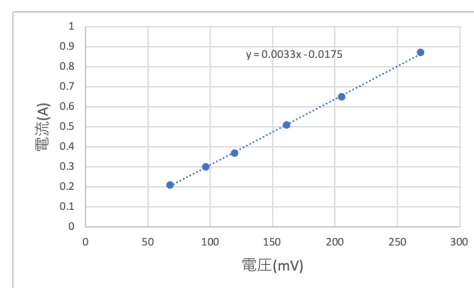


図 18: シャープペンシルの芯 H

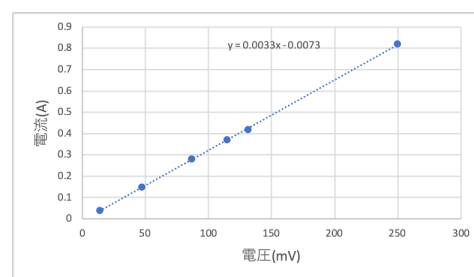


図 19: シャープペンシルの芯 2B

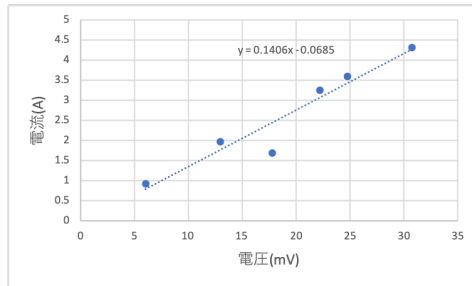


図 20: Ni

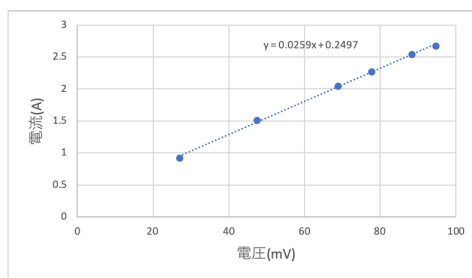


図 21: Ag

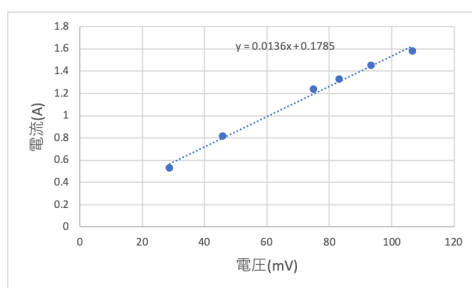


図 22: 不明試料

表 3: 抵抗値, 抵抗率

試料 (直径 mm)	抵抗値 (Ω)	2 端子 ($\mu\Omega\text{cm}$)
Cu(0.18)	0.0132	3.35
NiCr(0.17)	0.556	126
W(0.09)	0.1667	10.6
シャープペンシル の芯 H(0.5)	0.3030	594
シャープペンシル の芯 2B(0.5)	0.3030	594
Ni(0.9)	0.0711	45.2
Ag(0.07)	0.0386	1.49
不明 (0.195)	0.0735	22.0

2.4 Discussion

どの試料金属においても温度が上昇するにつれて低効率が高くなった現象について考察する。まず金属はエネルギーバンド図において伝導体に電子を常にとっておりこれは自由電子として電流を運ぶ役割を果たしている。ここで温度が上昇した場合は格子が熱でより激しく振動することになると予想される。したがって電子の通り道を格子が塞ぐ確率が高まり結果として単位時間に電子が衝突する回数が増え抵抗率が温度の上昇とともに上昇していくと考えられる。またこの現象から、電子の量が多くなることにより格子に衝突する電子の量が多くなることが予測される。これはオームの法則の説明であると考えられる。

また測定結果より未知試料だと思われる物質はストロンチウムだと考えられる。しかし他の金属試料において抵抗率のオーダーはあっていないもののその値は理科年表の値から多少ずれており測定において接触抵抗などのノイズが入ったことが考えられる。

またシャープペンシルの芯は濃さに寄らず同じ値を示したことから濃さに寄らずに同じ構造

をしていることが予想される．またシャープペンシルの芯はグラフェンであり結合に余分な価電子によって電流を通すが自由電子の数は金属に比べ少ないことが結果から考えられる．

3 To understand the current-voltage characteristic of semiconductor diodes(3rd day)

3.1 Purpose

半導体の電流電圧特性を理解する．

3.2 Procedure

Si ベースダイオード,LED, ツェナーダイオードの三種類の資料について電流電圧特性を計測する．この時電流が 40mA を超えないように注意する．またヒステリシス特性を観察するために電圧を上昇させた場合と下降させて行った場合の 2 通りを 2 回ずつ測定した．

3.3 Result

測定の結果電流電圧の関係をプロットすると以下のようなグラフが得られた．グラフよりいずれのダイオードもある一定の電圧がかからなければ電流を通さない性質を示した．

LED については電流が流れるのと同時に発光し始め、電圧を高くするにつれて光は強くなっていった．またいずれのダイオードも逆方向に電圧をかけても電流は流れなかった．

さらにグラフよりわかるように電圧をあげていった場合も電圧を下げた場合も電流の値は同じ値を取ったためヒステリシス特性は示さなかった．

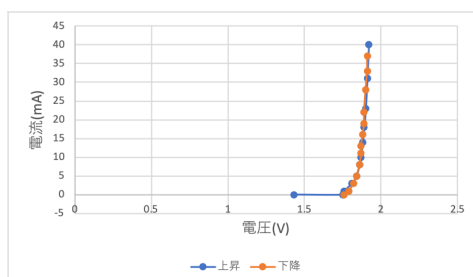


図 23: LED 1 回目

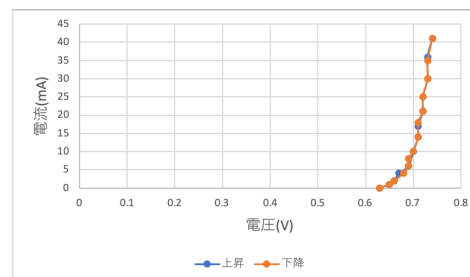


図 27: ツェナーダイオード 1 回目

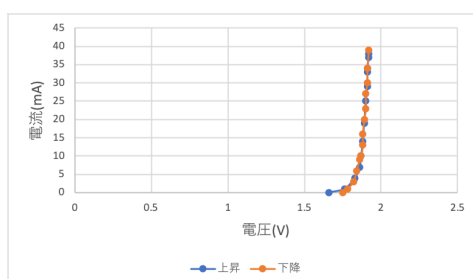


図 24: LED 2 回目

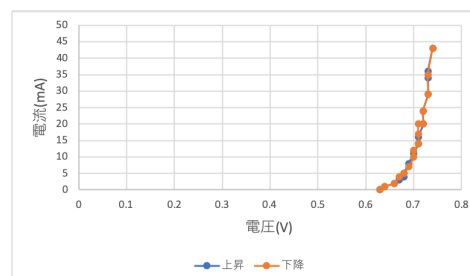


図 28: ツェナーダイオード 2 回目

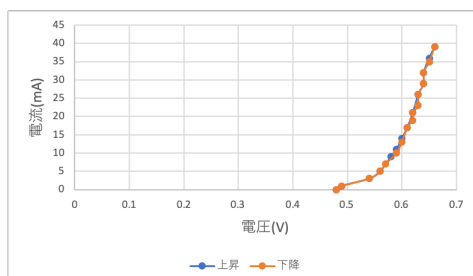


図 25: Si ダイオード 1 回目

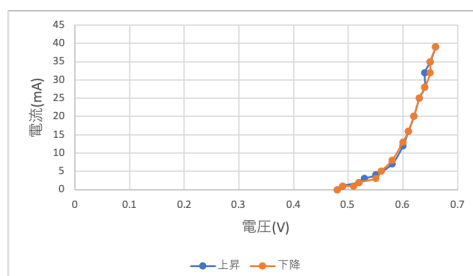


図 26: Si ダイオード 2 回目

3.4 Discussion

実験結果よりダイオードは順バイアス電圧をかけた際には電流を流すが逆バイアス時には電流は流れない整流作用の特性を持つので電流が逆流して欲しくない回路などに組み込んで応用することができると思われる。

次にダイオードの順バイアス時にある特定の電圧を超えた際に電流を流し始める特性について考察する。まずPN接合においては図29のようにP領域のキャリアとN領域の電子がそれぞれ接触し消滅する空乏層が生成される。この空乏層が障壁となるため順バイアスを印加した際にある一定電圧を超えないと電流を流さないのはこの電位障壁が理由だと考えられる。また逆バイアスをかけた際は空乏層を広げることとな

りこの時は電流を流すことはなくなる。これが整流作用の原理だと考えられる。

また逆バイアスをさらに印加していった際の振る舞いについて考察する。非常に大きな電圧を逆バイアスに印加した際はN型半導体の領域において電子は非常に大きな運動エネルギーを持つことになるがこの運動エネルギーが振動する格子に衝突することで減少し、格子にエネルギーが受け渡されるがこのエネルギーが格子の電子を励起させるのに十分な運動エネルギーを持っていた場合、ぶつかった格子から新たに自由電子とホールが生成される。またこの反応が再帰的に起こることで急激に電流が流れることが予想される。今回は実験の時間により逆バイアスの測定ができなかったが図30のように電圧電流特性を示すことが予想される。

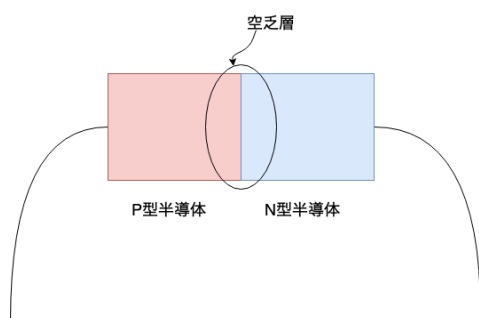


図 29: PN 接合

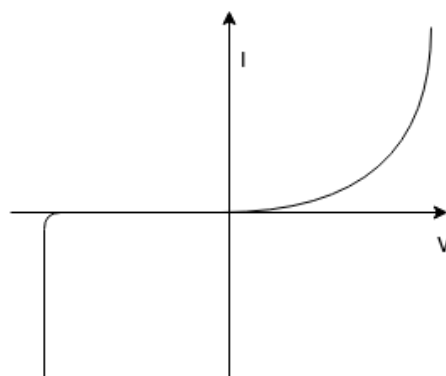


図 30: 電流電圧特性

4 Temperature dependence of the resistance(4th day)

4.1 Purpose

金属抵抗の温度による変化を学ぶ。

4.2 Procedure

まず試料を四端子測定法の測定回路に接続する。次に熱電対と共に試料を固定し液体窒素の入った容器の中に沈めていく。この時試料の温度は熱電対の起電力によって測定する。今回使用した熱電対はクロメル-アルメル熱電対であり測定部分を氷水の容器に浸し基準を 273K にして測定する。測定器の製作は図 35 のように組み立てる。

以上の手順で Cu, NiCr, W の低効率を測定していく。測定は室温から 77K 程度まで 5 段階に分けて測定を行なった。測定結果より抵抗値を最小二乗法で求めその温度依存性をグラフに示す。

4.3 Result

測定の結果温度と抵抗値の関係をプロットすると以下のようなグラフが得られた。

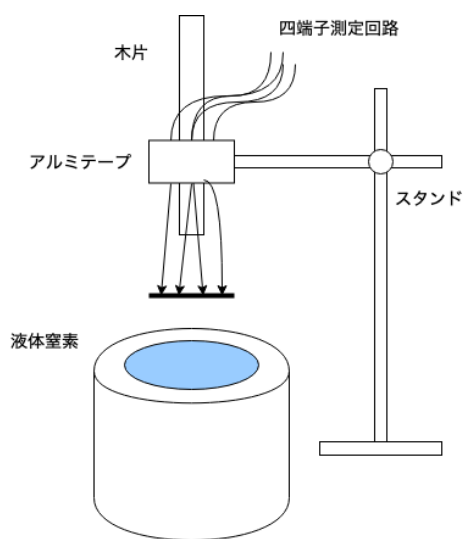


図 31: 温度依存性の実験装置

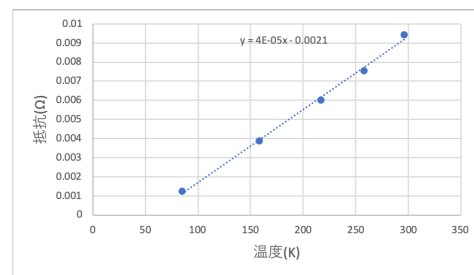


図 34: Cu の温度依存

4.4 Discussion

実験結果より温度が低くなるにつれて抵抗率が小さくなった原因について考える。まず前回の考察より金属中において電流の流れを障害するものは熱振動する格子だと考えられることがわかった。したがって温度が下がるとその分熱運動により振動する格子の振動の激しさは穏やかになることが予想され結果として電流が格子と衝突する回数がすくなく流れる電流量が多くなり抵抗率が小さくなることが予想される。

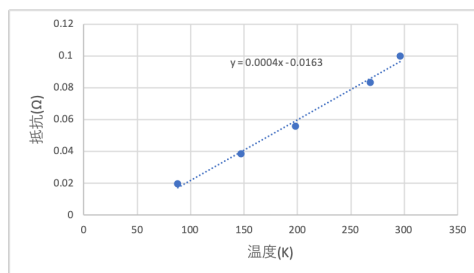


図 32: W の温度依存

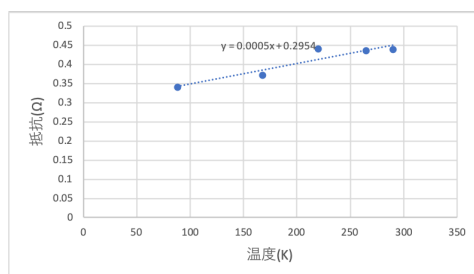


図 33: NiCr の温度依存

5 Measurement of current-voltage characteristics of thermistor (metal-oxide semiconductor) and mechanical pencil lead(carbon)(5th day)

5.1 Purpose

サーミスターとシャープペンシルの芯の電気抵抗の温度依存性を学習する。

5.2 Procedure

今回はサーミスター (103AT-11) とシャープペンシルの芯 (H,2B) について測定をおこなう。まず前回同様に図 35 のように装置を組み立てて四段階に温度を変えながら測定を行った後、それぞれの抵抗値を電流電圧測定値の傾きを最小二乗法によって求め温度依存性を考察する。

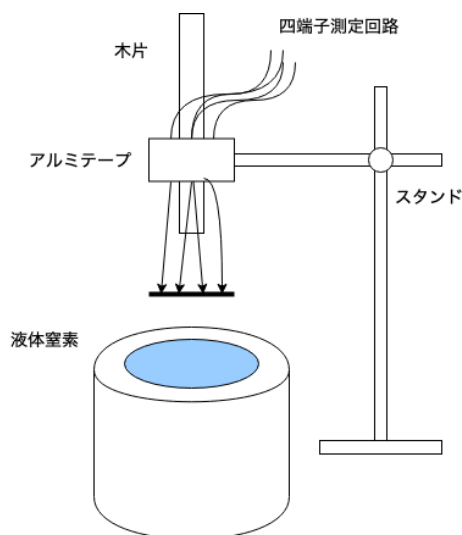


図 35: 温度依存性の実験装置

5.3 Result

測定の結果温度と抵抗値の関係をプロットすると以下のようなグラフが得られた。シャープペンの芯はどちらの芯も同じ温度依存性を示した。またサーミスターに関しては温度依存性を示さなかった。

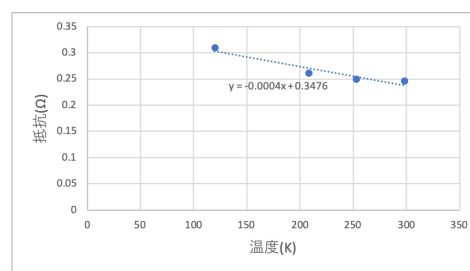


図 36: カーボン 2B の温度依存

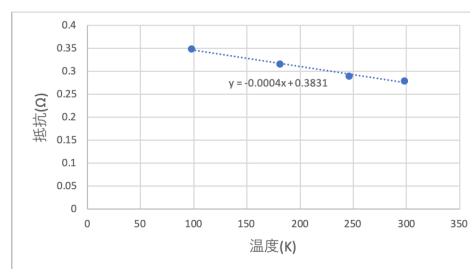


図 37: カーボン H の温度依存

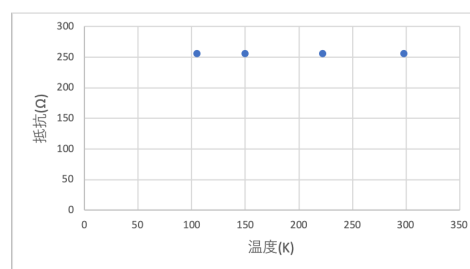


図 38: サーミスター (103AT-11) の温度依存

5.4 Discussion

前回の実験において室温でのシャープペンシルの芯は硬さに関わらず同じ抵抗値を示したのでシャープペンの芯の抵抗特性は硬度に依存しないと考えられたが，今回の実験でもこの二つの硬さにおける測定値に有意な差は観測できなかったのも硬さによってシャープペンシルの芯の構造は変わらないと考えられる．サーミスターの測定結果より今回の実験ではサーミスターの温度特性を観測できなかったのも実験の操作手順をミスしてしまった可能性が考えられる．もしくはサーミスターの抵抗変化が高温で起こることなどが考えられる．

また今回は前回の金属試料の温度特性と異なり温度が高くなるにつれて抵抗率が低くなった原因について考察する．エネルギーバンド図において非金属の半導体のバンド図は図 30 のようになる．このバンド図において電子の多くは価電子帯に存在しており伝導帯に存在する電子は少量と考えることができる．温度が上がることにより励起される価電子帯の電子がエネルギーギャップ E_g を超えることにより伝導帯に存在する電子が増え，結果として抵抗率が小さくなっていくと考えられる．

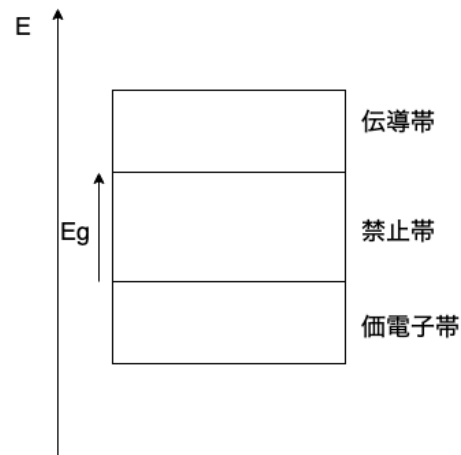


図 39: 半導体のバンド図

6 Measurement of the temperature dependence of the resistivity of $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$ as a superconductor(6th day)

6.1 Purpose

超電導の転移温度の測定を通して超電導の原理について学ぶ．

6.2 Procedure

前回同様に図 35 のように温度依存性の測定のための実験装置を組み立てる．次に超電導リボン ($Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$) の電圧-電流特性を四端子測定法で測定する．この時超電導のヒステリシス特性を観察するために室温から超電導が起こる相転移温度まで下げていった場合と，超電導状態から室温に近づけていった場合の二パターンについて測定を行いそれぞれの結果を温度-抵抗値のグラフにプロットしていく．測定の

際は電流が 100mA を超えないように注意して行う。

6.3 Result

測定の結果温度と抵抗値の関係をプロットすると以下のようなグラフが得られた。ヒステリシスが測定され、室温から温度を下げていった場合よりも超電導状態から室温にあげていった時は結果が全体的に左にシフトした。また実験結果より温度下降時は相転移温度は 140K ほど、上昇時は 130K ほどであることが確認された。

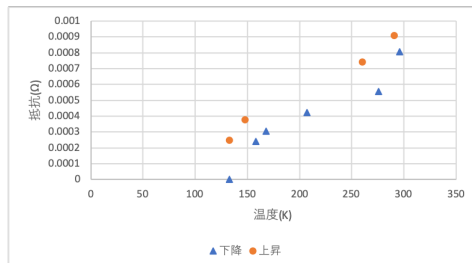


図 40: 温度下降

6.4 Discussion

超電導が起こる理由について考える。まず超電導が起きる極低温状態においては原子の熱振動は十分小さくなっていることが予想される。そこで一つの電子が原子に衝突すると原子が動かされ、プラスに帯電している原子は別の電子を引き寄せるとい原理によって結果として電子同士が引き寄せられる現象が図 41 が起きる。以上のようにして電子のペアについて片方が原子に衝突しても、その衝撃を片方がプラス、もう一方がマイナスに分散吸収してペア全体としては何事もなかったように進むことによって抵抗を感じずに電流を流すことができる。

次に超電導の応用について考える。超電導状態では小さい電圧で多くの電流を流すことができるので非常に強い磁場を作り出すことが可能である。これはリニアモーターカーなどで利用される。また量子コンピュータにおいては量子状態がノイズによって壊れることが問題であるためノイズを小さくするために超電導状態が利用される。もし超電導状態を室温で実現することができればリニアモーターカーが新幹線よりもコストの低い乗り物になることができ、量子コンピュータの製作コストが格段に低くなることが予想される。

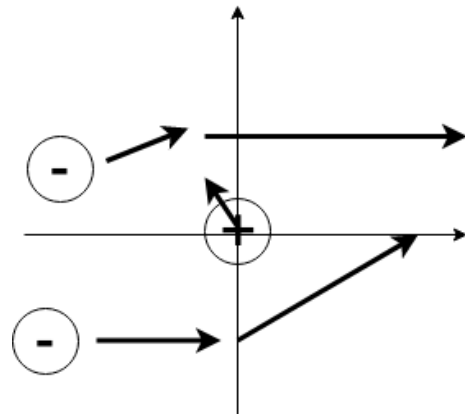


図 41: 超電導メカニズム

参考文献

- [1] 田中 昭二,「超電導のおはなし」, 日本規格協会 (1993)
- [2] 石飛 秀和 他, 「応用物理学実験」
- [3] 坂田 亮,「理工学基礎 物性科学」, 培風館 (1989)
- [4] 自然科学研究機構 国立天文台,「理科年表 2019 (机上版)」, 丸善 (2018)