

## 1. 目的

本実験では、超伝導体が示す現象である、ゼロ抵抗とマイスナー効果を実際に確認し、超伝導体の特性を理解することを目的とする。ゼロ抵抗の確認については、室温での抵抗測定のみを行い、低音領域での抵抗測定は実際には行わず、与えられたデータを解析することで、ゼロ抵抗の特性を理解する。マイスナー効果については、磁場中冷却と零磁場冷却の2つの冷却方法で冷却した $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ を磁石に近づけたり遠ざけたりすることで、磁石にどのような力が働くかを観察することで、マイスナー効果の特性を理解する。最後に、冷却した $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ を磁石を並べて作ったレール上に乗せて、その時の挙動を観察する。

## 2. 実験方法

### 2.1. 電気抵抗測定

ここでは、Pb-In と  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  (以下、YBCO) の室温での抵抗  $R$  の測定を行った。測定に際し、以下の式を用いた。

$$\begin{cases} R = \frac{V}{I} \\ R = \rho \frac{L}{S} \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 $\rho$  は試料の抵抗率、 $L$  は試料の長さ、 $S$  は試料の断面積、 $V$  は試料にかかる電圧、 $I$  は試料を流れる電流を表す。まず、ノギスを用いて試料の  $L, S$  を測定した。ここで、 $S$  に関しては、試料の高さ  $t$  と幅  $w$  を測定して、 $S = tw$  として求めた（今回は  $t$  の値は既知であった）。次に、電流計と電圧計を用いて、 $V, I$  を測定する前に、電流計のゼロ点調整を行った。Pb-In では、100 mA、YBCO では 20 mA の電流を流すために、精密な抵抗を用いて、それに電流を流した時の電圧を測定し、所望の電流を得た。その後、実際に試料に電流を流し、電圧を測定した。測定した電圧と流した電流を式 (1) に代入することで、抵抗値、抵抗率を求めた。

次に、室温以外での抵抗測定について与えられたデータから、温度と抵抗率の値をプロットし、そのグラフからゼロ抵抗の特性を確認した。この時、与えられたデータは、熱電対の起電力と試料の電位差を表したもので、熱電対の起電力を温度に換算することで、温度と抵抗率の関係を求めた。

### 2.2. 超伝導体と磁石の相互作用

ここでは、冷却した YBCO を磁石に近づけたり遠ざけたりすることで、磁石との相互作用を観察した。まず、周りに磁石がない状態で YBCO に液体窒素を流して冷却した（零磁場冷却）。磁石をの上位乗せ、冷却した YBCO を初めは磁石に近づけていき、その時の秤の値を読み取った。次に、磁石を遠ざけていき、また、磁石に近づけていき、それらの時も同様に秤の値を読み取った。

次に、磁石の上で YBCO を冷却した（磁場中冷却）。そして今回は、初めは YBCO を磁石から遠ざけていき、再び磁石に近づけていき、最後にまた YBCO を磁石から遠ざけていった。これらの時に、秤の値を読み取った。そして、読み取った秤の値全てを力に換算した。得られたデータから、

YBCO－磁石間の距離と磁石に働く力の関係をグラフにプロットし、マイスナー効果の特性を確認した。

## 2.3. 磁場上での超伝導体の運動

最後に、磁石を並べて作ったレール上に冷却した YBCO を乗せ、その時の挙動を観察した。磁石を並べたレール上に零磁場冷却を施された YBCO を乗せ、YBCO を軽く押して動かしたり、強い力で押した時の挙動を観察した。また、磁場中冷却された YBCO をレール上に乗せ、この時の挙動を観察した。そして、磁場中冷却された YBCO をレール上に乗せた状態で、レールの向きを反転させて、その時の挙動を観察した。

## 3. 実験結果

### 3.1. 電気抵抗測定

まず、室温（298 K）での Pb-In の寸法測定、抵抗測定の結果を表 1 に示す。次に、YBCO の寸法測定、抵抗測定の結果を表 2 に示す。

表 1: Pb-In の寸法測定、抵抗測定の結果

$L / \text{mm}$	$t / \text{mm}$	$w / \text{mm}$	$V / \text{mV}$	$I / \text{mA}$	$R / \text{m}\Omega$	$\rho / \Omega \cdot \text{m}$
1.50	0.10	2.40	0.201	100	2.01	$3.22 \times 10^{-7}$

表 2: YBCO の寸法測定、抵抗測定の結果

$L / \text{mm}$	$t / \text{mm}$	$w / \text{mm}$	$V / \text{mV}$	$I / \text{mA}$	$R / \text{m}\Omega$	$\rho / \Omega \cdot \text{m}$
1.20	0.80	3.15	0.182	20.0	9.1	$1.91 \times 10^{-5}$

次に、室温以外での抵抗測定について、与えられたデータから求めた Pb-In、YBCO における温度と低効率の値を表 3 に示す。ここで、温度の換算方法については、熱電対の起電力の小数第 2 位までの値だけだと、起電力の値は異なるが温度の値が同じになる場合があったため、小数第 3 位までの値と、小数第 2 位まで見た時の温度とその隣の温度の差から、温度を換算した。そして、表 1、表 2、表 3 から、Pb-In、YBCO それぞれの温度と抵抗率の値をプロットし、そのグラフからゼロ抵抗の特性を確認した。その結果を図 1、図 2 に示す。

表 3: 室温以外での抵抗測定における Pb-In、YBCO それぞれの温度と抵抗率の値

Pb-In		YBCO	
温度 /K	抵抗率 / $\Omega \cdot \text{m}$	温度 /K	抵抗率 / $\Omega \cdot \text{m}$
78.7	$2.82 \times 10^{-7}$	177.6	$3.00 \times 10^{-5}$
69	$2.73 \times 10^{-7}$	172	$2.96 \times 10^{-5}$
59	$2.62 \times 10^{-7}$	167.8	$2.95 \times 10^{-5}$
48	$2.53 \times 10^{-7}$	164.3	$2.91 \times 10^{-5}$
38.8	$2.50 \times 10^{-7}$	153.4	$2.86 \times 10^{-5}$
26.3	$2.45 \times 10^{-7}$	141.1	$2.78 \times 10^{-5}$
15	$2.45 \times 10^{-7}$	113.3	$2.65 \times 10^{-5}$
8.6	$2.38 \times 10^{-7}$	90.6	$2.53 \times 10^{-5}$
8.4	$2.36 \times 10^{-7}$	77.6	$2.36 \times 10^{-5}$
7.1	$5.46 \times 10^{-8}$	66	$2.23 \times 10^{-5}$
7.1	$3.87 \times 10^{-9}$	60.5	$2.18 \times 10^{-5}$
6.4	$2.82 \times 10^{-9}$	55.5	$2.09 \times 10^{-5}$
6.4	$2.46 \times 10^{-9}$	43.9	0
5.7	$2.64 \times 10^{-9}$	37.7	0
5.2	$2.99 \times 10^{-9}$	30.9	$2.52 \times 10^{-7}$
4.8	$2.82 \times 10^{-9}$	29.3	$1.26 \times 10^{-7}$
4.4	$2.82 \times 10^{-9}$	23	$1.26 \times 10^{-7}$
4.3	$3.17 \times 10^{-9}$	12.9	$1.26 \times 10^{-7}$
4.2	$3.17 \times 10^{-9}$	4.2	$1.26 \times 10^{-7}$

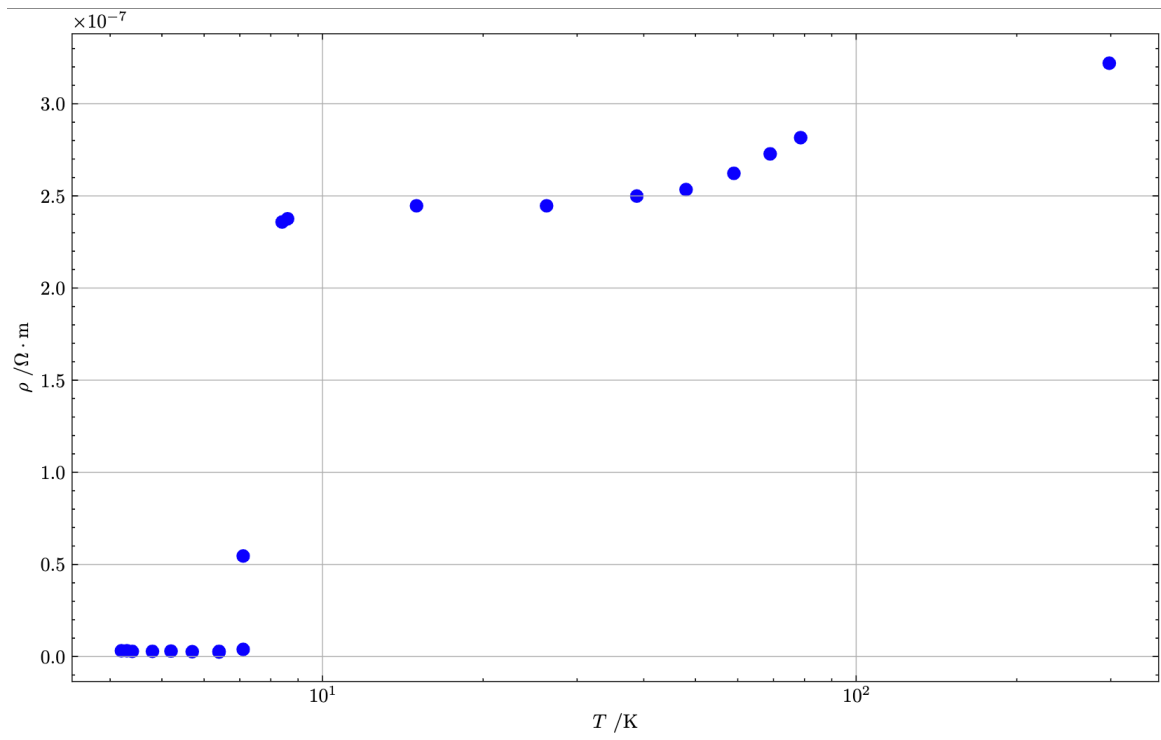


図 1: Pb-In の温度と抵抗率の値

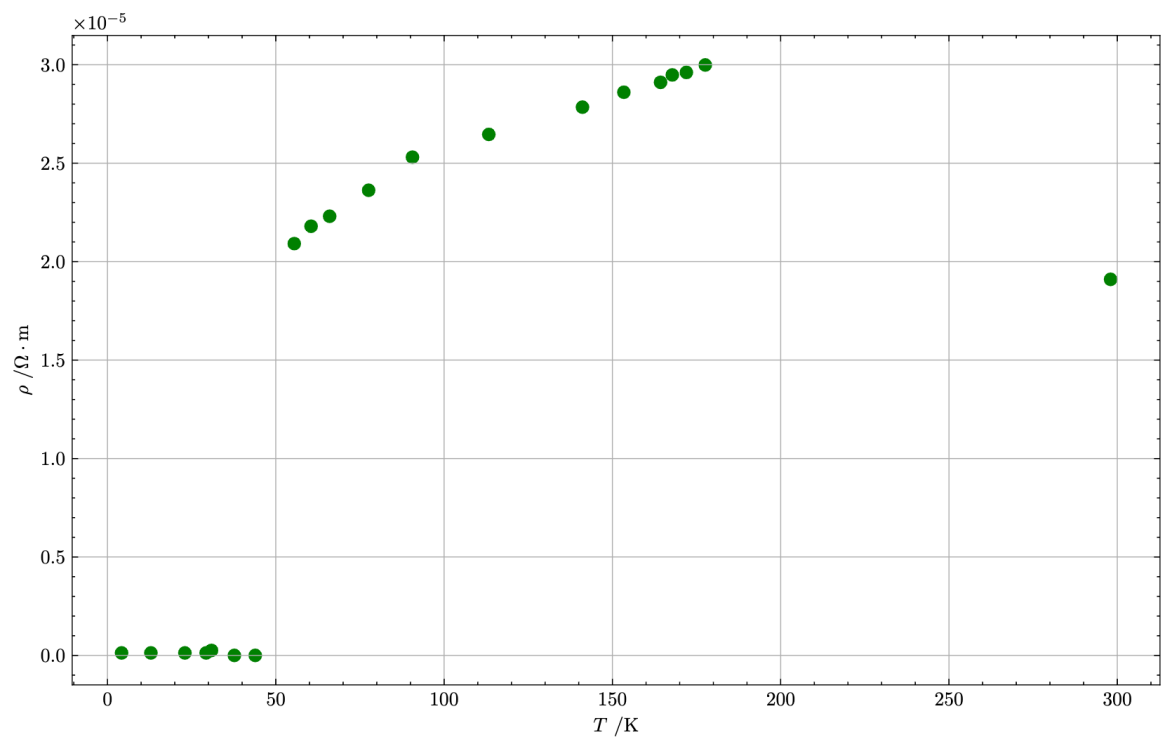


図 2: YBCO の温度と抵抗率の値

### 3.2. 超伝導体と磁石の相互作用

まず、零磁場冷却における、磁石と YBCO の距離に対する磁石にかかる力の関係を表 4 に示す。そして、表 4 から、距離と磁石にかかる力の関係をプロットした結果を図 3 に示す。

表 4: 零磁場冷却における、磁石と YBCO の距離に対する磁石にかかる力の関係

近づける向き (1 回目)		遠ざける向き (1 回目)		近づける向き (2 回目)	
距離 /cm	力 /N	距離 /cm	力 /N	距離 /cm	力 /N
11.8	0	0.1	0.499	10.05	0
10.8	0	0.2	0.365	9.05	0
9.8	0	0.3	0.261	8.05	0
8.8	0	0.4	0.208	7.05	0
7.8	0	0.5	0.154	6.05	$-9.80 \times 10^{-4}$
6.8	0	0.6	0.120	5.05	$-1.96 \times 10^{-3}$
5.8	0	0.7	$8.92 \times 10^{-2}$	4.05	$-2.94 \times 10^{-3}$
4.8	$9.80 \times 10^{-4}$	0.8	$6.47 \times 10^{-2}$	3.05	$-3.92 \times 10^{-3}$
4.3	$1.96 \times 10^{-3}$	0.9	$5.19 \times 10^{-2}$	2.55	$-2.94 \times 10^{-3}$
3.8	$2.94 \times 10^{-3}$	1	$3.43 \times 10^{-2}$	2.05	$3.92 \times 10^{-3}$
3.3	$6.86 \times 10^{-3}$	1.5	$9.80 \times 10^{-4}$	1.55	$2.25 \times 10^{-2}$
2.8	$1.27 \times 10^{-2}$	2	$-6.86 \times 10^{-3}$	1.05	$7.94 \times 10^{-2}$
2.3	$2.45 \times 10^{-2}$	2.5	$-8.82 \times 10^{-3}$	0.95	$9.41 \times 10^{-2}$
1.8	$5.00 \times 10^{-2}$	3	$-7.84 \times 10^{-3}$	0.85	0.122
1.3	0.102	4	$-4.90 \times 10^{-3}$	0.75	0.153
0.8	0.219	5	$-2.94 \times 10^{-3}$	0.65	0.182
0.7	0.256	6	$-9.80 \times 10^{-4}$	0.55	0.230
0.6	0.299	7	$-9.80 \times 10^{-4}$	0.45	0.286
0.5	0.349	8	0	0.35	0.347
0.4	0.397	9	0	0.25	0.436
0.3	0.483	10	0	0.15	0.540
0.2	0.553			0.05	0.651
0.1	0.630				
0	0.745				

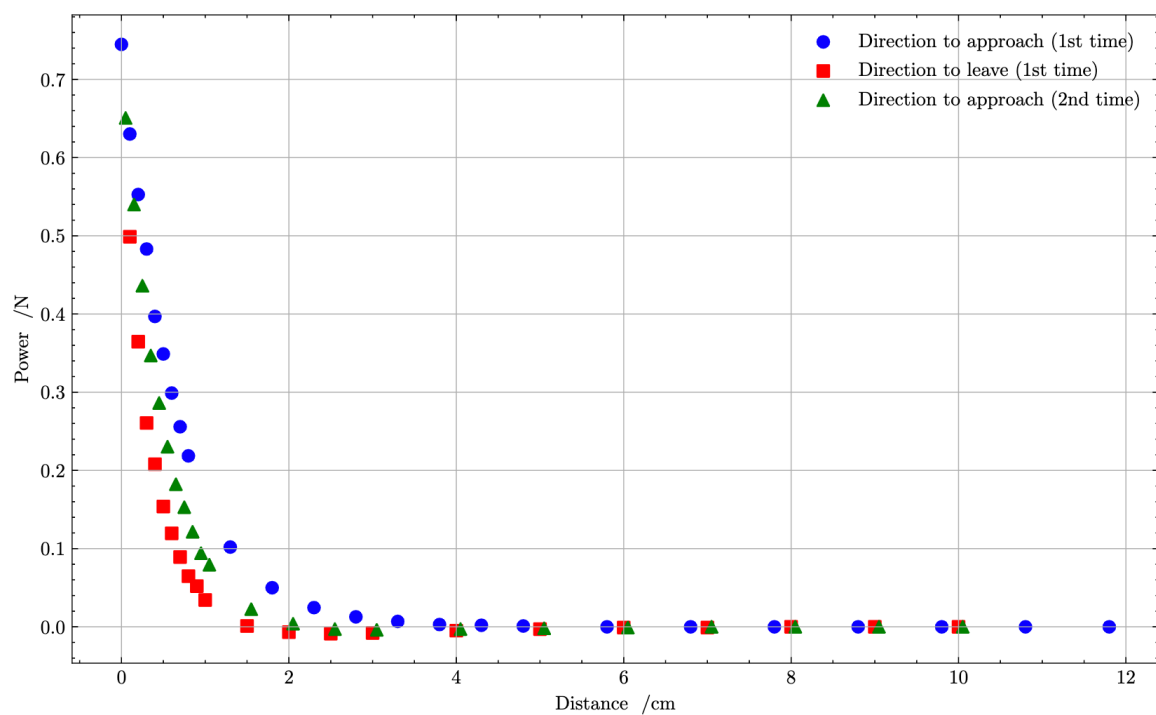


図 3: 零磁場冷却における、磁石と YBCO の距離に対する磁石にかかる力の関係

次に、磁場中冷却における、磁石と YBCO の距離に対する磁石にかかる力の関係を表 5 に示す。そして、表 5 から、距離と磁石にかかる力の関係をプロットした結果を図 4 に示す。

表 5: 磁場中冷却における、磁石と YBCO の距離に対する磁石にかかる力の関係

遠ざける向き (1 回目)		近づける向き (1 回目)		遠ざける向き (2 回目)	
距離 /cm	力 /N	距離 /cm	力 /N	距離 /cm	力 /N
0	$1.18 \times 10^{-2}$	10	0	0	0.204
0.1	-0.112	9	0	0.1	$1.57 \times 10^{-2}$
0.2	-0.184	8	$-9.80 \times 10^{-4}$	0.2	$-7.94 \times 10^{-2}$
0.3	-0.220	7	$-1.96 \times 10^{-3}$	0.3	-0.128
0.4	-0.240	6	$-4.90 \times 10^{-3}$	0.4	-0.164
0.5	-0.245	5	$-9.80 \times 10^{-3}$	0.5	-0.184
0.6	-0.243	4	$-1.96 \times 10^{-2}$	0.6	-0.191
0.7	-0.236	3	$-3.82 \times 10^{-2}$	0.7	-0.194
0.8	-0.225	2.5	$-5.49 \times 10^{-2}$	0.8	-0.190
0.9	-0.216	2	$-7.64 \times 10^{-2}$	0.9	-0.185
1	-0.200	1.5	-0.123	1	-0.176
1.5	-0.140	1	-0.123	1.5	-0.128
2	$-9.31 \times 10^{-2}$	0.9	-0.123	2	$-8.82 \times 10^{-2}$
2.5	$-6.37 \times 10^{-2}$	0.8	-0.120	2.5	$-6.08 \times 10^{-2}$
3	$-4.41 \times 10^{-2}$	0.7	-0.115	3	$-4.21 \times 10^{-2}$
4	$-2.16 \times 10^{-2}$	0.6	-0.101	4	$-2.06 \times 10^{-2}$
5	$-1.08 \times 10^{-2}$	0.5	$-8.23 \times 10^{-2}$	5	$-9.80 \times 10^{-3}$
6	$-5.88 \times 10^{-3}$	0.4	$-5.19 \times 10^{-2}$	6	$-4.90 \times 10^{-3}$
7	$-2.94 \times 10^{-3}$	0.3	$-1.76 \times 10^{-2}$	7	$-1.96 \times 10^{-3}$
8	$-1.96 \times 10^{-3}$	0.2	$2.94 \times 10^{-2}$	8	$-9.80 \times 10^{-4}$
9	0	0.1	0.116	9	0
10	0	0	0.215	10	0

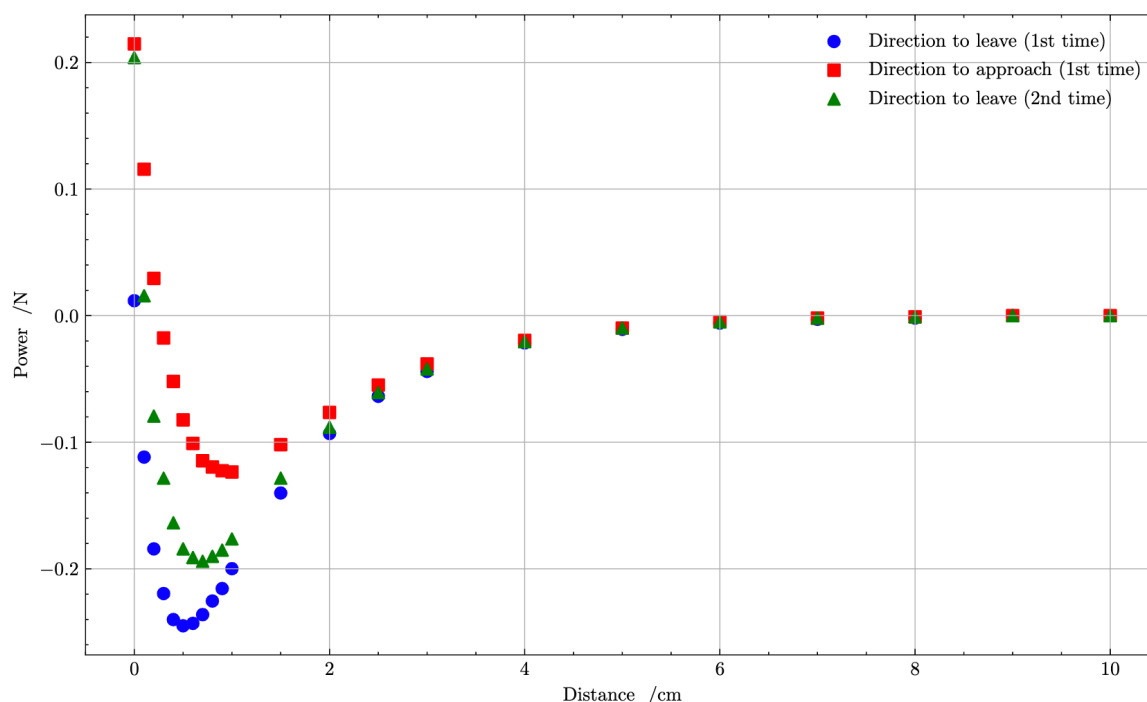


図 4: 磁場中冷却における、磁石と YBCO の距離に対する磁石にかかる力の関係

### 3.3. 磁場上での超伝導体の運動

まず、零磁場冷却をした YBCO をレールに乗せると、YBCO はレール上を浮遊した。そして、ある程度の力で YBCO を押してみると、YBCO は押された方向に動いた。この時、YBCO はレール上を滑り、レールから外れることはなかった。しかし、ある一定の力を超えた力で押してみると、YBCO はレールから外れてしまった。次に、磁場中冷却をした YBCO をレールに乗せると、YBCO はレールに引っ付いていて、持ち上げようとする、YBCO がレールに引っ付こうとする引力を感じることができた。そして、YBCO がレールに引っ付いている状態でレールを反転させると、YBCO はレールから少し離れた位置で浮遊し、YBCO を押してみると、YBCO は押された方向に動いた。この時、運動の速さは零磁場冷却をした時よりも速く、軽い力でより簡単に動いた。

## 4. 考察

### 4.1. Pb ではなく、Pb-In を用いた理由

本実験では、Pb ではなく、Pb-In を用いた。Pb-In を用いた理由は、Pb は超伝導転移温度が 7.2 K (実験動画を参照) であるが、その時の抵抗率が非常に小さく、今回の実験系では測ることが難しいからではないかと考えられる。まず、7.2 K における Pb の抵抗率を求めてみる。[1] より、

## 参考文献

- [1] 八光電機, “各種物質の性質: 金属の電気抵抗,” URL: <https://www.hakko.co.jp/library/qa/qakit/html/h01100.htm>.