

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、 ρ 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）。磁石をのに乗せ、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 / mm	t / mm	w / mm	V / mV	I / mA	$R / \text{m}\Omega$	$\rho / \Omega \cdot \text{m}$
1.50	0.10	2.40	0.201	100	2.01	3.22×10^{-7}

表 2: YBCO の寸法測定、抵抗測定の結果

L / mm	t / mm	w / mm	V / mV	I / mA	$R / \text{m}\Omega$	$\rho / \Omega \cdot \text{m}$
1.20	0.80	3.15	0.182	20.0	9.1	1.91×10^{-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	2.82×10^{-7}	177.6	3.00×10^{-5}
69	2.73×10^{-7}	172	2.96×10^{-5}
59	2.62×10^{-7}	167.8	2.95×10^{-5}
48	2.53×10^{-7}	164.3	2.91×10^{-5}
38.8	2.50×10^{-7}	153.4	2.86×10^{-5}
26.3	2.45×10^{-7}	141.1	2.78×10^{-5}
15	2.45×10^{-7}	113.3	2.65×10^{-5}
8.6	2.38×10^{-7}	90.6	2.53×10^{-5}
8.4	2.36×10^{-7}	77.6	2.36×10^{-5}
7.1	5.46×10^{-8}	66	2.23×10^{-5}
7.1	3.87×10^{-9}	60.5	2.18×10^{-5}
6.4	2.82×10^{-9}	55.5	2.09×10^{-5}
6.4	2.46×10^{-9}	43.9	0
5.7	2.64×10^{-9}	37.7	0
5.2	2.99×10^{-9}	30.9	2.52×10^{-7}
4.8	2.82×10^{-9}	29.3	1.26×10^{-7}
4.4	2.82×10^{-9}	23	1.26×10^{-7}
4.3	3.17×10^{-9}	12.9	1.26×10^{-7}
4.2	3.17×10^{-9}	4.2	1.26×10^{-7}

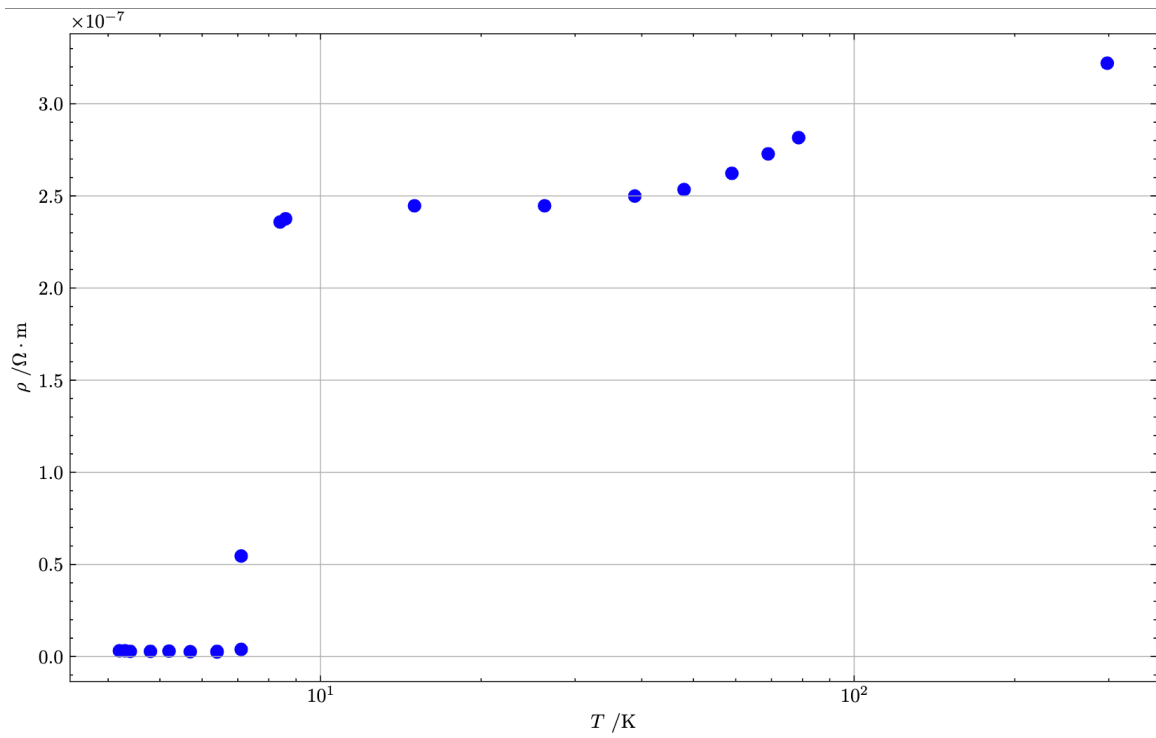


図 1: Pb-In の温度と抵抗率の値

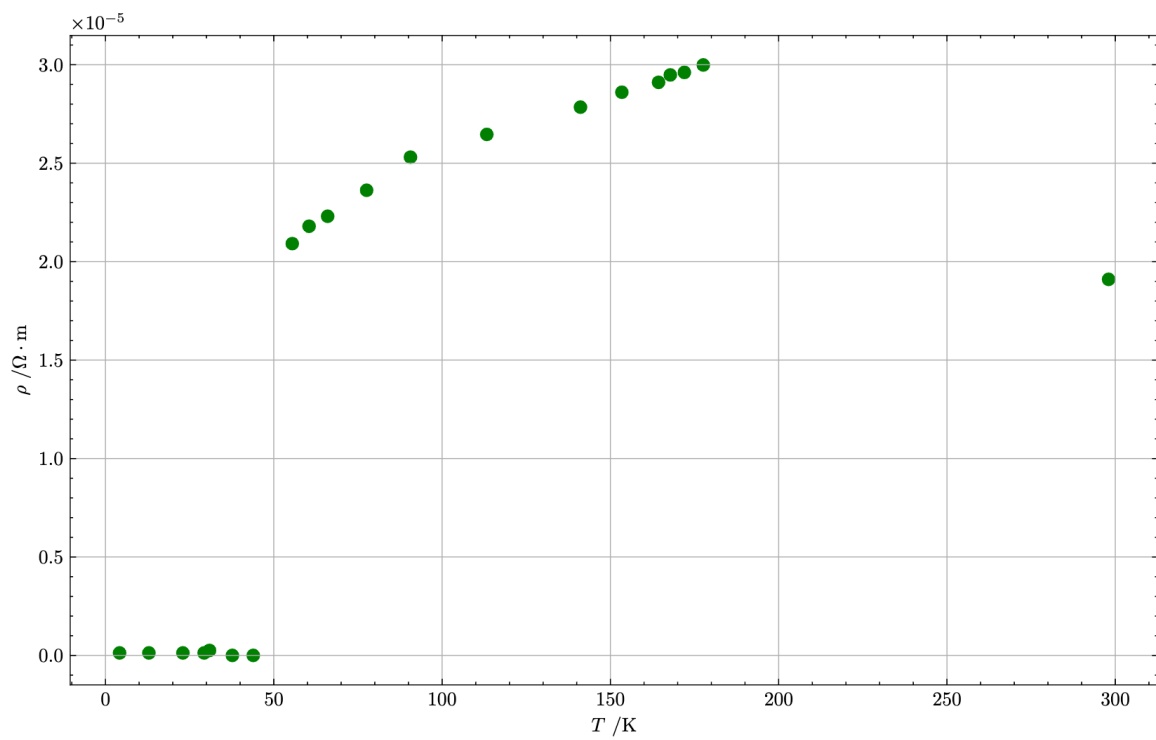


図 2: YBCO の温度と抵抗率の値

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	-9.80×10^{-4}
6.8	0	0.6	0.120	5.05	-1.96×10^{-3}
5.8	0	0.7	8.92×10^{-2}	4.05	-2.94×10^{-3}
4.8	9.80×10^{-4}	0.8	6.47×10^{-2}	3.05	-3.92×10^{-3}
4.3	1.96×10^{-3}	0.9	5.19×10^{-2}	2.55	-2.94×10^{-3}
3.8	2.94×10^{-3}	1	3.43×10^{-2}	2.05	3.92×10^{-3}
3.3	6.86×10^{-3}	1.5	9.80×10^{-4}	1.55	2.25×10^{-2}
2.8	1.27×10^{-2}	2	-6.86×10^{-3}	1.05	7.94×10^{-2}
2.3	2.45×10^{-2}	2.5	-8.82×10^{-3}	0.95	9.41×10^{-2}
1.8	5.00×10^{-2}	3	-7.84×10^{-3}	0.85	0.122
1.3	0.102	4	-4.90×10^{-3}	0.75	0.153
0.8	0.219	5	-2.94×10^{-3}	0.65	0.182
0.7	0.256	6	-9.80×10^{-4}	0.55	0.230
0.6	0.299	7	-9.80×10^{-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				

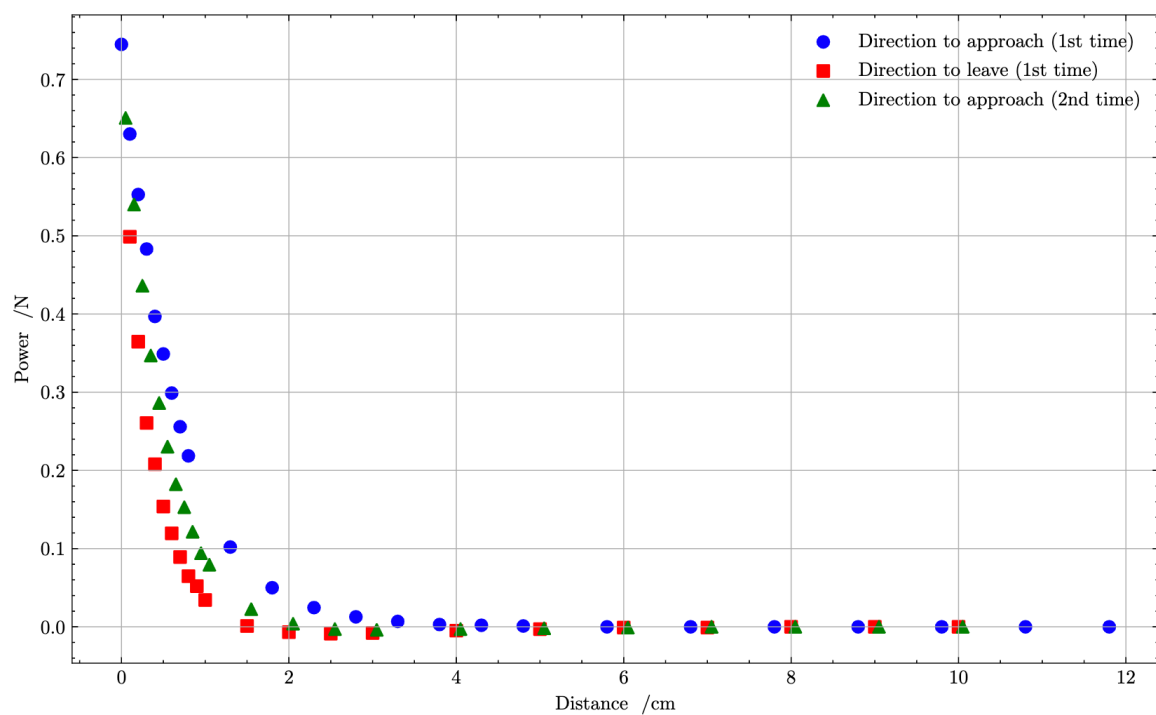


図 3: 零磁場冷却における、磁石と YBCO の距離に対する磁石にかかる力の関係

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	1.18×10^{-2}	10	0	0	0.204
0.1	-0.112	9	0	0.1	1.57×10^{-2}
0.2	-0.184	8	-9.80×10^{-4}	0.2	-7.94×10^{-2}
0.3	-0.220	7	-1.96×10^{-3}	0.3	-0.128
0.4	-0.240	6	-4.90×10^{-3}	0.4	-0.164
0.5	-0.245	5	-9.80×10^{-3}	0.5	-0.184
0.6	-0.243	4	-1.96×10^{-2}	0.6	-0.191
0.7	-0.236	3	-3.82×10^{-2}	0.7	-0.194
0.8	-0.225	2.5	-5.49×10^{-2}	0.8	-0.190
0.9	-0.216	2	-7.64×10^{-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	-9.31×10^{-2}	0.9	-0.123	2	-8.82×10^{-2}
2.5	-6.37×10^{-2}	0.8	-0.120	2.5	-6.08×10^{-2}
3	-4.41×10^{-2}	0.7	-0.115	3	-4.21×10^{-2}
4	-2.16×10^{-2}	0.6	-0.101	4	-2.06×10^{-2}
5	-1.08×10^{-2}	0.5	-8.23×10^{-2}	5	-9.80×10^{-3}
6	-5.88×10^{-3}	0.4	-5.19×10^{-2}	6	-4.90×10^{-3}
7	-2.94×10^{-3}	0.3	-1.76×10^{-2}	7	-1.96×10^{-3}
8	-1.96×10^{-3}	0.2	2.94×10^{-2}	8	-9.80×10^{-4}
9	0	0.1	0.116	9	0
10	0	0	0.215	10	0

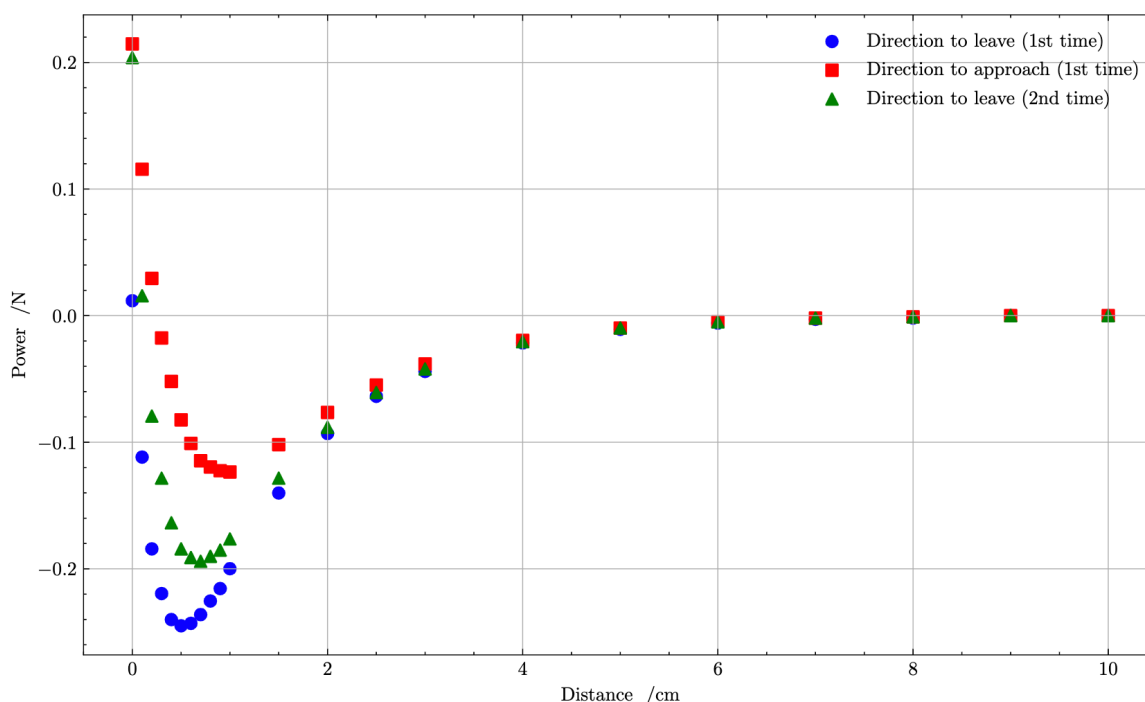


図 4: 磁場中冷却における、磁石と YBCO の距離に対する磁石にかかる力の関係

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、ある一定の力を越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。参考文献[1] より、Pb の温度に対する抵抗率の関係は、以下の表 6 で表される。またこれをグラフにプロットし、線形近似した結果を図 5 に示す。

表 6: Pb の温度に対する抵抗率の関係

	78 K	273 K	373 K
抵抗率 / $\Omega \cdot \text{m}$	4.70×10^{-8}	1.92×10^{-7}	2.70×10^{-7}

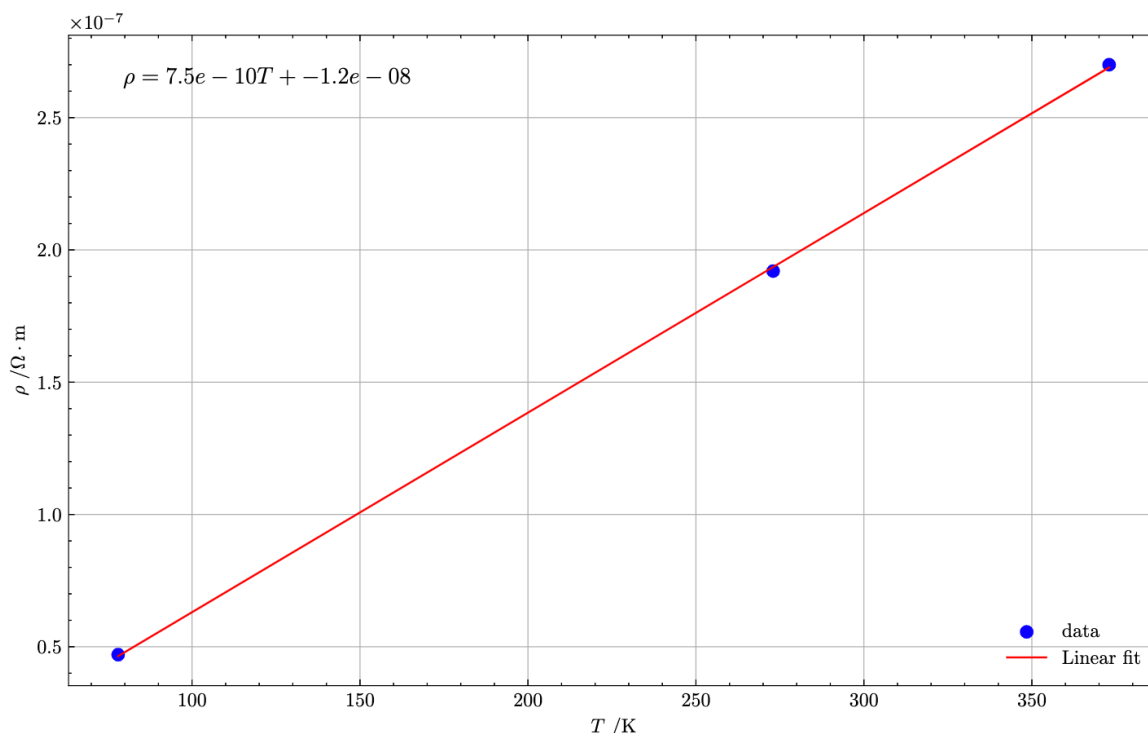


図 5: Pb の温度に対する抵抗率の関係

しかし、図 5 から、線形回帰の結果、7.2 Kにおける Pb の抵抗率は0を下回るため、実際の抵抗率の値をここから算出するのは難しい。次に、今回の電圧測定装置は、 μV オーダーの電圧を測定することができた。そのため、電圧値が $1\mu\text{V}$ 変化した時、抵抗率がどの程度変化するかを考える。表 1 での寸法値を用いると、

$$\frac{0.001}{100} * \frac{0.1 * 2.40}{1.50} * 0.001 = 1.6 \times 10^{-9} \Omega \cdot \text{m} \quad (2)$$

となる。これらを基に推測すると、Pb の7.2 Kにおける抵抗率は、 $1.6 \times 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$ 程度、もしくはそれよりも小さい値なため、超伝導転移をする前とした後の抵抗率の変化を測定することが難しいと考えられる。それに対し In は、抵抗率の変化の傾きが Pb に比べて小さく、超伝導転移温度でもある程度大きい抵抗率を示すと考えられるため、それを Pb に添加することで、超伝導転移温度の測定を容易にできると考えられる。

4.2. Pb と In の組成比

Pb の超伝導転移温度が7.2 Kであるのに対し、In の超伝導転移温度は3.41 Kである。表 3 より、7.1 Kで、Pb-In の抵抗率の急激な現象が確認できる。よって、これを基に以下の式で抵抗率を求めてみる。

$$\begin{cases} x + y = 1 \\ 7.2x + 3.41y = 7.1 \end{cases} \quad (3)$$

これを解くと、 $x = 0.974, y = 0.026$ となった。ただ、2.6%程度の In の添加によって、4.1 で考察したように、Pb の抵抗率が変化するのかどうか疑問である。しかし、超伝導転移温度付近の In の抵抗率の具体的な値を得ることができなかったため、ここでは、この先の議論を保留する。

4.3. Pb-In と YBCO の残留抵抗率

表 3 から Pb-In と YBCO の残留抵抗率を求めた。Pb-In は、8.4~78.7 K、YBCO では、55.5~177.6 K で、残留抵抗率を求めた。その結果を図 6、図 7 に示す。

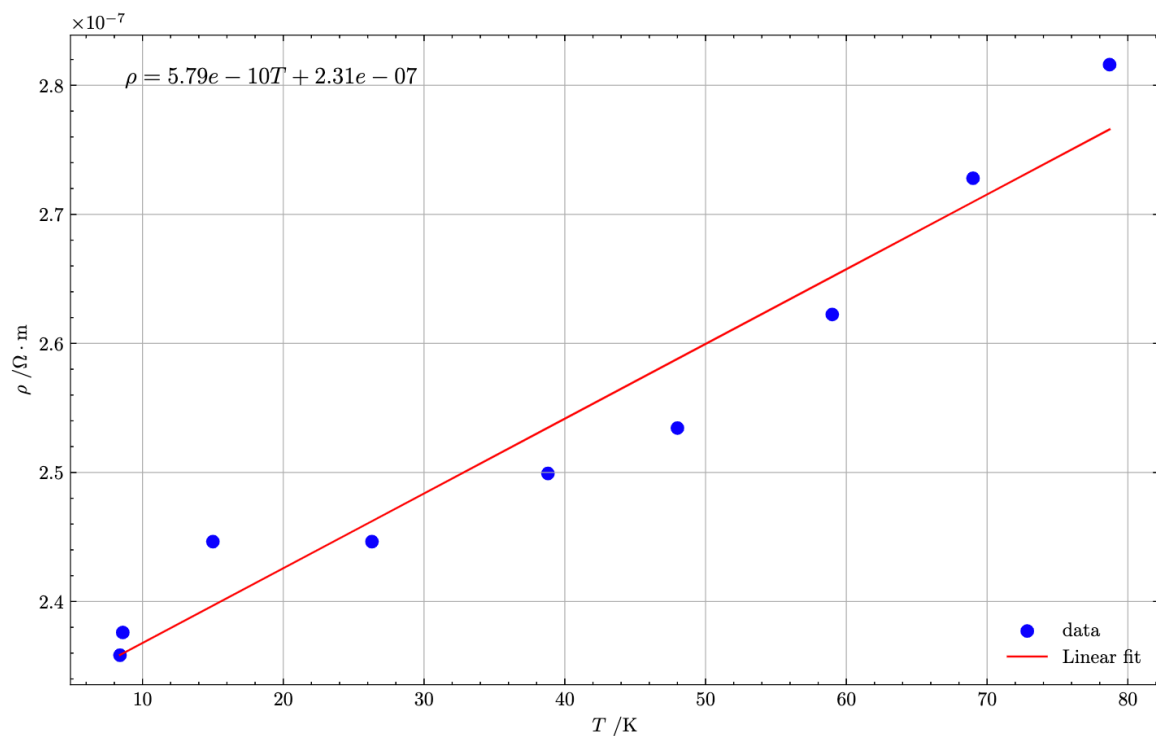


図 6: Pb-In の残留抵抗率

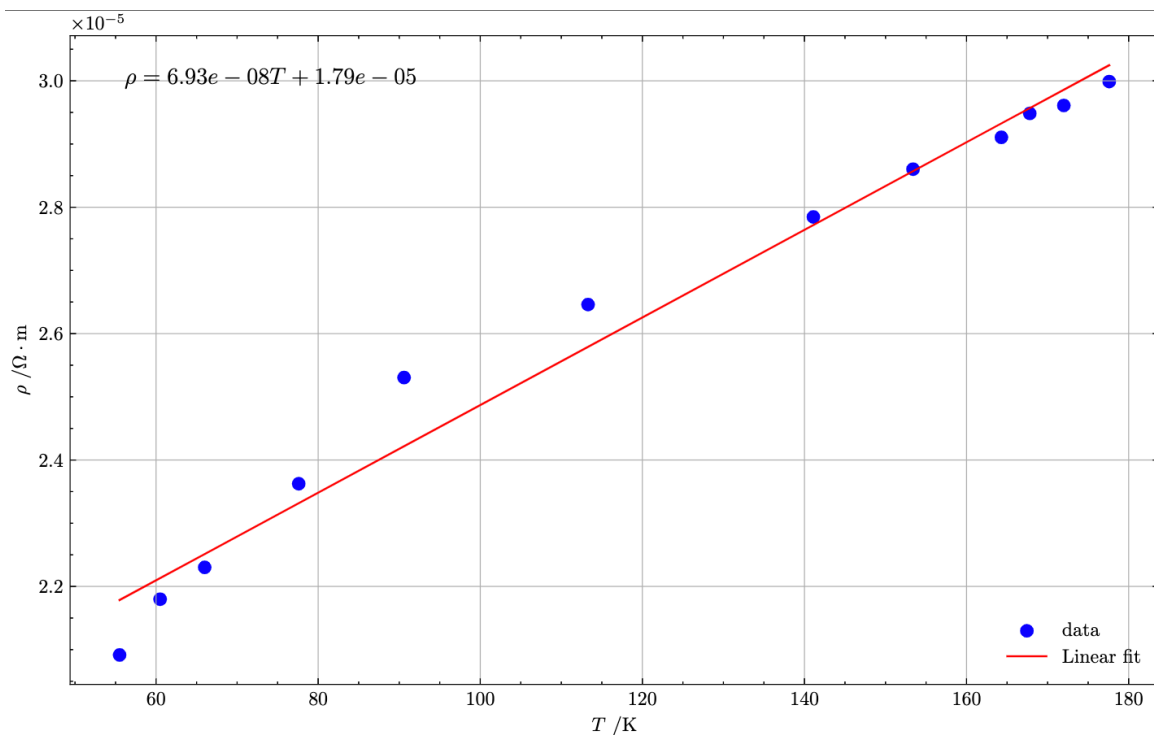


図 7: YBCO の残留抵抗率

4.4. Pb-In と YBCO の電気抵抗率比とそれらの純度

図 6、図 7 から、Pb-In と YBCO の残留抵抗率を求めた。次に、室温での Pb-In、YBCO の抵抗率を残留抵抗率で割ることで、それぞれの電気抵抗率比を求めた。その結果を表 7 に示す。

表 7: Pb-In と YBCO の残留抵抗率

	Pb-In	YBCO
室温での抵抗率 / $\Omega \cdot m$	3.22×10^{-7}	1.91×10^{-5}
残留抵抗率 / $\Omega \cdot m$	2.31×10^{-7}	1.79×10^{-5}
電気抵抗率比	1.39	1.07

この抵抗率比は純度の指標になる。参考[2]によると、「温度を下げると、金属の抵抗がぐんぐん下がるのに対して、絶縁体の抵抗は発散的に増大する。」ということがわかっているようだ。つまり、純度が高ければ、金属的な性質により、残留抵抗率が小さくなり、抵抗率比が大きくなると考えられる。そのため、Pb-In は YBCO の 2 つを比較すると、Pb-In の方が純度が高いと考えられる。しかし、今回は室温での測定と室温以外での測定で実験環境が違うので、図 6、図 7 から、室温 (298 K) での Pb-In、YBCO の抵抗率を残留抵抗率で割ることで、それぞれの電気抵抗率比を求めた。その結果を表 8 に示す。

表 8: Pb-In と YBCO の残留抵抗率

	Pb-In	YBCO
室温での抵抗率 / $\Omega \cdot \text{m}$	4.035×10^{-7}	4.855×10^{-5}
残留抵抗率 / $\Omega \cdot \text{m}$	2.31×10^{-7}	1.79×10^{-5}
電気抵抗率比	1.75	2.71

この結果だと、YBCO の方が純度が高いと考えられる。

4.5. 零磁場冷却での磁石と YBCO の距離に対する磁石にかかる力の関係

図 3 から、零磁場冷却での磁石と YBCO の距離に対する磁石にかかる力の関係を示した。まず、グラフの形状についてだが、これは、クーロンの法則より、磁極間に働く力が距離の 2 乗に反比例するためである。そして、経路によって、磁石にかかる力が変化することについては YBCO のピン止め効果が原因であると考えられる。最初、YBCO を近づける時は、ある一定の距離までは、マイスナー効果によって、磁石とは逆向きに磁化する。しかし、ある一定の距離になると磁石の磁場が強いことから、YBCO 内に磁束が侵入する。その侵入した磁束がピン止め効果によりその場に留まることで、さらなる時速の侵入を防ぎ、結果的に磁石の磁場と反対向きに磁化した状態を保てる。しかし、一部はピン止め効果の影響により、侵入した磁束線の向きに磁化するため、磁石に引き寄せられる力がその部分に対し働く。そのため、YBCO を遠ざける向きの時は、初めに近づける向きにはなかった引力を受けるために磁石を感じる斥力が小さくなり、グラフのように力が小さくなったと考えられる。そして、再び近づける向きにすると、遠ざける向きの時よりは閉じ込めていた磁束が解放されるが一部残留した磁束によって引力を感じるため、遠ざける向きの時よりも力が大きくなり、1 回目の近づける向きの時よりは力が小さくなると考えられる。

次に、磁場中冷却の時のグラフ図 4 のグラフの形について考える。まず、磁場中冷却の際は、本来は零磁場の時と同様に外部の磁場に対し逆向きに磁化するが、ピン止め効果によって、冷却前に通過して磁束が閉じ込められる。よって、零磁場冷却の時のグラフのような斥力に加えて磁石には距離に反比例する引力が働く。そのため、グラフは引力と斥力を重ね合わせたような形になっていることがわかる。また経路による力の違いについては、最初の遠ざける向きの時は、ピン止め効果による引力が強く影響し、力が負の向きに大きくなる。そして、近づける向きの時は、ピン止めされた磁束の一部が解放されるため、引力の影響が小さくなる。そして、再び遠ざける向きにすると、再び磁束が侵入し、ピン止めされるため、近づける向きの時よりも力が大きくなるが、冷却の時ほど時速は侵入しないと考えられるため、1 回目の遠ざける向きの時よりは小さくなると考えられる。

4.6. 磁場上での超伝導体の運動

まず、零磁場冷却した YBCO をレール上に置いた時の運動について考察する。零磁場冷却された YBCO はマイスナー効果によって物体内部で磁束が存在しないようになり、外部の磁場に対し逆向きの磁化を得る。レールの磁石が N-S-N の時、真ん中に S 極からの磁束の影響が最も強いと、

YBCO の下面は S 極に磁化される。そうすると、真ん中の S 極からは斥力、端の N 極からは引力を受ける。また、ピン止め効果の影響も受けると考えられる。S 極の磁束が一部侵入し、YBCO の端の方でピン留めされるとその部分だけ下面が N 極になる。その結果、YBCO はレール乗を浮くことができ、斥力が推進力となり、YBCO が押された時に動くことができる。また、レールの端の N 極が YBCO の中央下面の S 極を引っ張りあうことで、ある程度の速さで運動する場合はレール上にとどまることができると考えられる。そして、遠心力が N 極の引力より大きくなる、つまりある程度の速さで運動すると、YBCO はレールから逸れると考えられる。次にレール上で冷却された YBCO がその場にとどまり浮かばないのは、図 4 の時とは違い、磁石と接している状態で冷却されたため、YBCO の下面は磁石の磁束線と同じ向きに磁化される。そのたね、このような挙動を見せる。そして、レールの向きを反転させると、YBCO は重力によりレールと距離ができ、その後、図 4 の時と同様の条件になるため、ある一定の距離になったところで、引力が最大値になり、その最大値が重力と釣り合うことで、YBCO が浮き、レール乗を動かすることができるのだと考えられる。また、いずれ YBCO が落ちてしまうこともピン止め効果によって閉じ込められていた磁束が徐々に解放されることによって引力が減少すると考えると説明がつく。

結論

本実験では、Pb-In と YBCO を超伝導体として用いることでゼロ抵抗とマイスナー効果を実際に確認した。Pb ではなく、Pb-In を用いることで、超伝導転移温度の測定を測定を容易にした。また、Pb-In と YBCO の残留抵抗率を求め、電気抵抗率比を求めたことで、Pb-In の方が純度が高いと考えたが、実験環境の違いを考慮して室温での抵抗率を計算し、電気抵抗率比を求め直してみると、YBCO の方が純度が高いとわかった。そして、零磁場冷却での磁石と YBCO の距離に対する磁石にかかる力の関係を調べ、YBCO のピン止め効果により、経路によって力のかかり方に違いが生じることがわかった。このピン止め効果によってレール上での YBCO の運動が説明できることがわかった。

参考文献

- [1] 八光電機, “各種物質の性質：金属の電気抵抗,” Accessed on 22.10.2024 URL: <https://www.hakko.co.jp/library/qa/qakit/html/h01100.htm>.
- [2] 井野明洋, “固体物理学 I 講義ノート 伝導電子の古典論,” Accessed on 23.10.2024 URL: https://home.hiroshima-u.ac.jp/ino/lecture/SSP1note2_ino2017.pdf.