

## 1 実験条件

実験日時 2010（平成 22）年 6 月 10 日木曜日 午後 1 時～午後 4 時半

天気 晴れ

気圧・気温・湿度 省略

## 2 実験の目的

低温技術ならびに微小信号計測技術の習得と、超伝導体における最も基本的な性質である完全導電性と完全反磁性を実際に観測することを目的とする。

## 3 実験の原理

### 1. 超伝導体の性質について

超伝導体とは完全導電性と完全反磁性を示す物質のことで、単体からなる第 1 種超伝導体と合金の第 2 種超伝導体に分けられる。両者は極低温領域で通常の電気伝導（常伝導）の状態から臨界温度で超伝導の状態に相転移し、電気抵抗が 0 になる。これが完全導電性である。第 1 種の場合は相転移は急に起こり、図 1 のように抵抗値が急に 0 に落ちる。第 2 種の場合は常伝導状態と超伝導状態の間に混合状態があり、印加磁界に対する磁性の変化が第 1 種と異なる。

相転移時の臨界磁界  $H_c$  と温度の関係は図 2 のように表される。超伝導状態（S）と常伝導状態（N）の境界線は物質固有のものである。境界線の式は第 1 種超伝導体の場合、次の式でよく近似される。

$$H_c(T) = H_0 \left\{ 1 - \left( \frac{T}{T_c} \right)^2 \right\} \quad (1)$$

第 2 種超伝導体の場合、S と N の間に混合状態が挟まる形となる。臨界磁界以下の磁界中で超伝導が

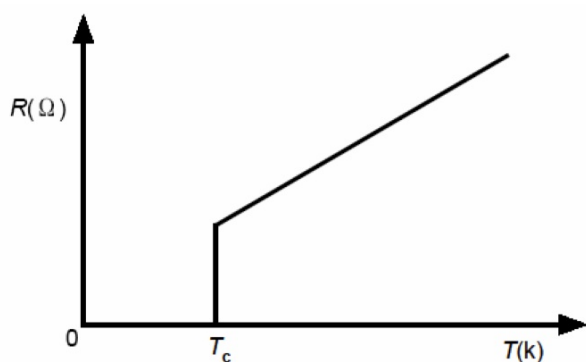


図 1 超伝導体の抵抗の温度依存性

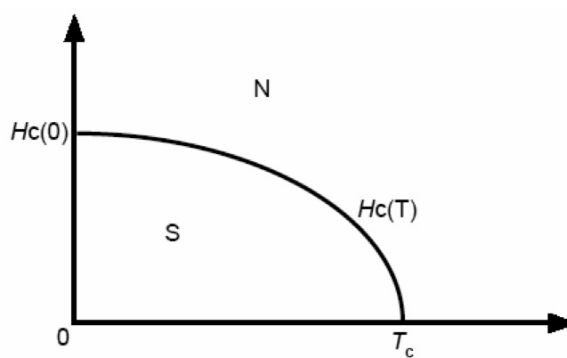


図 2 超伝導体の臨界磁界の温度依存性

示す性質が完全反磁性である。図 3 に示すのがマイスナー効果である。左側に表す常温状態では磁界が物質中に入り込んでいるが、右側の臨界温度以下の状態では物質内部の磁界が 0 となり、磁界が曲げら

れる。第1種の場合は物質内部の磁界が完全に0になるが、第2種では混合状態下で一部の磁界のみが外に押し出され、一部はうず糸と呼ばれる環状電流が流れている形で侵入する。

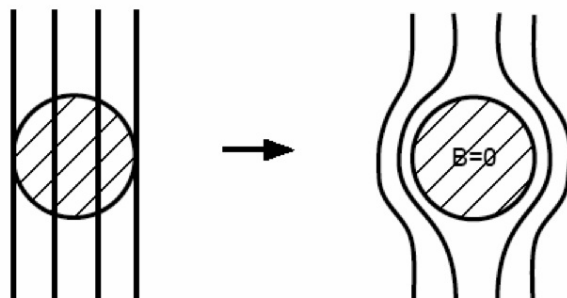


図3 マイスナー効果による、完全反磁性の模式図

2. ロンドン方程式とマイスナー効果について完全導電性を仮定し、電界  $E$  をかけたときの電子の運動方程式は式 (2) で表される。ただし  $m$  : 電子の質量、 $n$  : 電子の密度、 $e$  : 電子の素電荷、 $J$  : 電流密度である。

$$E = \frac{m}{ne^2} \frac{dJ}{dt} \quad (2)$$

これにマクスウェル方程式  $\text{rot} E = -dB/dt$  を用いると

$$\frac{d}{dt}(\Lambda \text{rot} \mathbf{J} + \mathbf{B}) = 0, \Lambda = \frac{m}{ne^2} \quad (3)$$

ここで F.London は完全導電性のもとで  $\Lambda \text{rot} \mathbf{J} + \mathbf{B} = 0$  を仮定した。ここでマクスウェル方程式の  $\text{rot} \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}$  を用いると

$$\frac{\Lambda}{\mu_0} \text{rot} \cdot \text{rot} \mathbf{B} + \mathbf{B} = 0 \quad (4)$$

となる。超伝導体表面に平行な磁場  $B_0$  を加えていたとしてこれを解くと

$$B(x) = B_0 \exp(-x/\lambda_L), \lambda_L^2 = \frac{\Lambda}{\mu_0} = \frac{m}{ne^2 \mu_0} \quad (5)$$

を得る。これを図示したものが図4である。この図は磁束密度が超伝導体の表面から  $\lambda_L$  程度の距離までしか及ばないことを示している。 $\lambda_L$  は London の磁界侵入深さと呼ばれており、一般に試料の大きさに比べて十分小さいため。マクロな物体ではこれを無視することができて完全反磁性が示される。

3. 低温技術について実験に使う低温環境を用いるために使う、沸点の低い液体を寒剤といい、液体ヘリウム、液体水素、液体窒素、液体酸素が代表的であるが、水素と酸素については反応性が高く最悪爆発を伴うことがあるので、一般にはヘリウムと窒素が用いられる。当実験では液体窒素を使うため、換気に気をつけ、革手袋をする、使用しない時はできるだけ密閉するなどの注意が必要である。

クライオスタットとは試料を低温に保持して温度を制御する装置のことであり、固体伝導・輻射・対流などの熱の流入を防ぐ機能がある。当実験では GM 型クライオスタットを使用した。

温度計は熱電対、抵抗温度計などがあるが、当実験ではシリコンダイオード温度計を用いた。原理はダイオードの順方向電圧-電流特性を用いている。

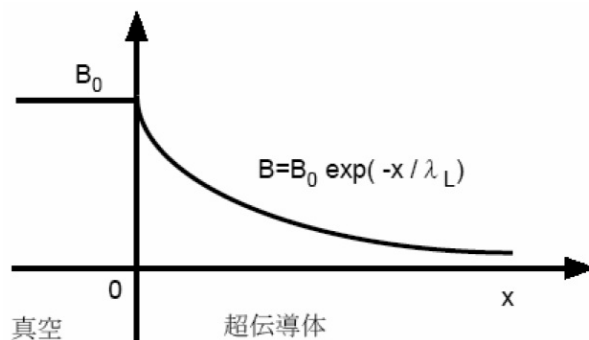


図 4 超伝導体の内部の磁束密度

## 4 使用器具及び装置

- ロータリーポンプ
- 発信器
- ロックインアンプ
- 電圧計
- 交流電流計
- 配線
- オシロスコープ
- GM 型クライオスタット
- 液体窒素
- コイル
- $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  焼結体
- LCR メータ
- 時計
- 筆記用具・グラフ用紙・実験レジュメ・実験ノート・カメラ

## 5 実験結果

**実験 1** 抵抗 4 端子測定法を用いて図 5 のように回路を組み、試料をセッティングした。導通不良がないことを確認した後、ロータリーポンプで真空排気を行い、十分に時間をかけてクライオスタット内の気圧を下げた。温度計で温度をモニタし、200K と 100K 以降の電圧をロックインアンプで測定した。この時のロックインアンプは感度  $20\mu\text{V}$ 、Time Constant が 1s であった。発信器の出力電圧が 1V、出力インピーダンスが  $600\Omega$  であったため回路全体のインピーダンスもほぼこれと等しくなり、平均 0.050A の電流が流れていた。よってオームの法則から各温度における抵抗値を計算しまとめたものが表 1 である。このデータをもとに平滑化し、微分のグラフを描き図 6 にまとめた。この図より  $dR/dt$  のピークの半値をとる幅  $\Delta T_c$  を求めたところ、 $\Delta T_c = 2.67\text{K}$  であった。

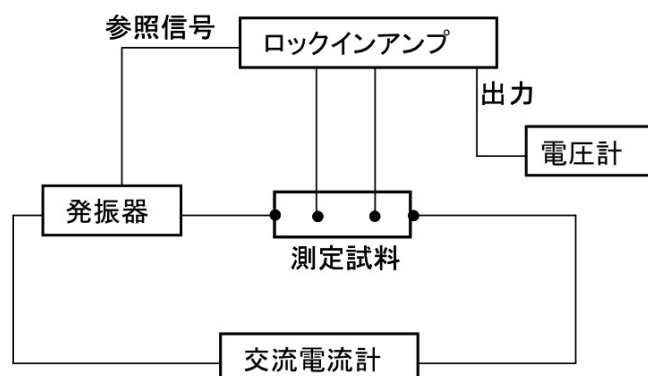


図 5 実験装置の配線

表 1 実験 1・ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  の抵抗の温度依存性

data		
Temp.[K]	Volt[ $\mu\text{V}$ ]	resist[m $\Omega$ ]
200	12.62	252.4
100	12.84	256.8
99.0	12.82	256.4
98.0	12.81	256.2
97.0	12.79	255.8
96.0	12.77	255.4
95.0	12.75	255.0
94.0	12.73	254.6
93.0	12.70	254.0
92.0	12.66	253.2
91.0	12.63	252.6
90.0	12.58	251.6
89.0	12.54	250.8
88.5	12.52	250.4
88.0	12.48	249.6
87.5	12.45	249.0
87.0	12.40	248.0
86.5	12.37	247.4
86.0	12.32	246.4
85.5	12.27	245.4
85.0	12.19	243.8
84.8	12.16	243.2
84.6	12.12	242.4
84.4	12.08	241.6
84.2	12.02	240.4
84.0	11.98	239.6
83.8	11.93	238.6
83.6	11.84	236.8
83.4	11.75	235.0
83.2	11.62	232.4
83.0	11.39	227.8
82.8	10.93	218.6

82.6	10.32	206.4
82.4	9.63	192.6
82.2	8.68	173.6
82.0	7.60	152.0
81.9	7.00	140.0
81.8	6.67	133.4
81.7	6.22	124.4
81.6	5.85	117.0
81.5	5.51	110.2
81.4	5.20	104.0
81.3	4.85	97.0
81.2	4.58	91.6
81.1	4.27	85.4
81.0	3.97	79.4
80.9	3.65	73.0
80.8	3.30	66.0
80.7	3.08	61.6
80.6	2.76	55.2
80.5	2.48	49.6
80.4	2.21	44.2
80.3	1.94	38.8
80.2	1.68	33.6
80.1	1.43	28.6
80.0	1.22	24.4
79.9	1.00	20.0
79.8	0.80	16.0
79.7	0.63	12.6
79.6	0.51	10.2
79.5	0.36	7.20
79.4	0.24	4.80
79.3	0.15	3.00
79.2	0.08	1.60
79.1	0.01	0.20

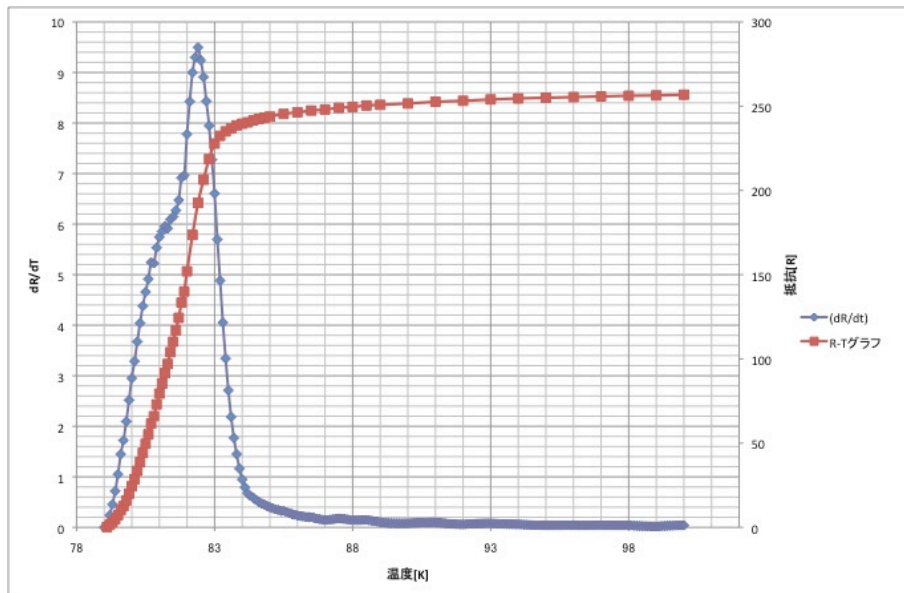


図6 実験1・ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  の抵抗の温度依存曲線および  $\frac{dR}{dT}$  曲線

## 実験2 省略

**実験3** 超伝導体試料の周りにコイルを巻き、LCRメータに配線した。その概略図を図7に示す。常温での自己インダクタンスを測ると0.295mHであった。次にLCRメータの電源を入れた状態でコイルを液体窒素に入れて15分放置し、自己インダクタンスを測ったところ0.247mHであった。そしてLCRメータの電源を入れたままコイルを取り出し、自己インダクタンスが0.295mHに戻ったことを確認してLCRメータの電源を切った。そのままコイルを液体窒素に入れ、10分放置後LCRメータの電源を再投入し、自己インダクタンスを測ったところ0.247mHであった。

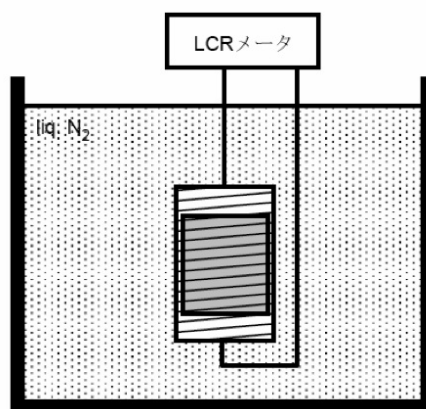


図7 実験3・実験装置

## 6 検討

- (1) 式 (4) で、

$$\text{rot} \cdot \text{rot} \mathbf{B} = \nabla \times (\nabla \times \mathbf{B}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{B}) - \nabla^2 \mathbf{B} = -\nabla^2 \mathbf{B} (\because \nabla \cdot \mathbf{B} = 0) \quad (6)$$

と変形できるから、

$$\nabla^2 \mathbf{B} = \frac{\mu_0}{\Lambda} \mathbf{B} \quad (7)$$

となる。この微分方程式の  $x$  成分のみを考えたときの解は

$$B_x = B_0 \exp\left(-\sqrt{\frac{\mu_0}{\Lambda}} x\right) \quad (8)$$

と表される。ここで  $\lambda_L^2 = \frac{\Lambda}{\mu_0} = \frac{m}{ne^2\mu_0}$  とおけば、式 (5) が得られる。

さらに式 (5) に  $m=9.10 \times 10^{-31}[\text{kg}]$ 、 $n=10^{22}[\text{cm}^{-3}] = 10^{28}[\text{m}^{-3}]$ 、 $e=1.60 \times 10^{-19}[\text{C}]$ 、 $\mu_0 = 1.25 \times 10^{-6}[\text{H/m}]$  を代入すると、 $\lambda_L=53.3[\text{nm}]$  を得る。

- (2) 一般的に抵抗計測に用いられる 2 端子法は、抵抗の両端に配線した電圧計で電圧を計測すると、配線・接触抵抗の影響を受け、微小抵抗を計測するのには向いていない。そこで図 8 に示す 4 端子法を用いると、計測したい微小抵抗  $x$  の他に、回路には  $x_1 \sim x_4$  の 4 種の抵抗が見えることになるが、抵抗  $x$  を流れる電流  $I$  に対して、電位差計にはほとんど電流は流れないため、 $x_3$  および  $x_4$  の電圧降下はほとんど無視できる。よって抵抗  $x$  での電圧降下を正確に測ることができる。  
当実験では超伝導体の微小抵抗の変化を測るため、上で述べたような理由から 4 端子法を採用したと考えられる。

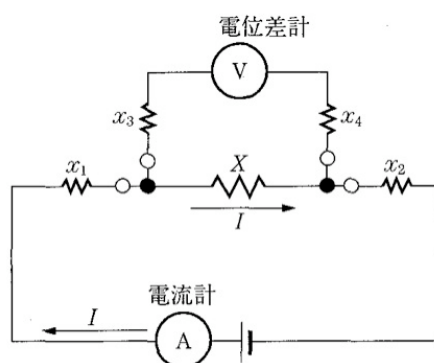


図 8 4 端子法の回路図

- (3) 省略
- (4) ロックインアンプとは、測定対象の周波数成分のみを非常に鋭い選択性で取り出すことのできる装置で、強い雑音除去性能を持つ。動作原理は測定信号とは別に交流の参照信号を入力し、それぞれを乗算して直流成分と交流成分に分けて取り出す。雑音成分は周波数成分を保持しているため、これをローパスフィルタで除去し、直流成分を測定すれば目的の信号強度を調べることができる。

当実験では配線にシールドを施すなどの工夫を行ったが、それでも実験室中の照明や電子機器、携帯電話などの出す電磁波による影響、発信器にのった交流雑音信号のノイズを受けて微小電圧を計測するのに誤差が生じると考えられる。そこでロックインアンプを使うことでそれらのノイズをカットし、計測精度を上げることができたと考えられる。

- (5) 図 1 と図 6 を比較すると、後者の方が超伝導転移幅が大きい。これは実験で使用した  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  焼結体が均一な超伝導体ではないからであると考えられる。試料は簡易的な方法で生成されたものであり、酸素の組成を決める  $\delta$  の値が 0 から 1 の間で変化するため、焼結体全てが精密に同じ組成になっていない可能性があり、温度のばらつく原因になっていると考えられる。臨界温度の理論値は 92K であるが、実験では 79K から 84K の間で転移しているのはこのためであろう。
- (6) 実験 3 ではあらかじめ磁界をかけた状態でもそうでない状態でも自己インダクタンスは同じ値となった。これと同じ実験を理想的な完全導電体 ( $\sigma = \infty$ ) で行くと、式 (3) が示すように  $A \text{rot} \mathbf{J} + \mathbf{B} = C(\text{const})$  となる。右辺の定数  $C$  は電界をかける前の常伝導状態を表すものであるから、最初に常伝導状態の時に外部から磁界をかけた場合と、超伝導状態になってから磁界をかけた場合では  $C$  が異なり、よって磁界  $\mathbf{B}$  も異なると考えられる。

## 7 結論

1. 超伝導は完全導電性と完全反磁性を持つ物質の性質のことで、臨界温度で抵抗が急激に 0 に落ちること、物質内に磁界を生じないマイスナー効果を示すという重要な特性がある。マイスナー効果はロンドン方程式で示すことができる。
2. 低温環境を作るための寒剤にはいくつか種類があるが、液体窒素の使用には事故防止のための注意が必要である。
3. 微小信号計測には  $Q$  値が大きいロックインアンプが適しており、入力信号・参照信号の積を LPF に通すことで超伝導体の微小な電圧降下を測ることができる。

## 8 謝辞

最後になったが、実験に協力してくれた班員の 5 人と、丁寧に指導して下さいました先生方・TA の方々に感謝申し上げたい。

## 9 参考文献

- 実験テキスト「B6 超伝導体の電氣的・磁氣的特性の低温基礎実験」
- 実験テキスト「B2 ロックイン信号計測」
- 「大阪大学物理学実験 2008」大阪大学物理教育研究会編 学術図書出版社 第 2 版第 1 刷 第 2 編
- 「電子物性入門」浜口智尋著 丸善株式会社 第 18 刷
- 「計測工学」鈴木亮輔他著 昭晃堂 初版第 10 刷
- 「 $\text{\LaTeX}$  2<sub>ε</sub> 美文書作成入門 改訂第 4 版」奥村晴彦著 技術評論社 第 4 版第 6 刷

以上