

パイプ型高温超伝導体による磁気浮上

永田 敏夫 大久保 政俊 村上 俊一

イットリウム系の銅酸化物高温超伝導体を作成し、超伝導体のマイスナー効果を利用してネオジウム磁石を浮上させ超伝導現象を観察する。これを磁界の反発力と関連づけながら現象を理解し、さらに超伝導体にネオジウム磁石が安定して浮く理由やピン止めを利用した超伝導コースターが運動する原理について考えるため、超伝導体を矩形に切って並べそのすき間に沿って磁石を運動させるなど超伝導現象を理解し興味を深める教材を開発したので報告する。

キーワード 超伝導 マイスナー効果 ピン止め 銅酸化物高温超伝導体 イットリウム

はじめに

超伝導体の特徴には電気抵抗が転移点以下でゼロになることと超伝導体に外部の磁場をうち消すように表面に電流が流れて外部磁界が追い出されるマイスナー効果がある。このため磁力線が外部に排除されるが、これが外部に磁石をおいたときに磁石が反発する理由である。超伝導体ができているかどうかは、液体窒素で冷やしたとき、ネオジウム磁石が反発して浮くかどうかで判断した。

超伝導体のマイスナー効果だけでは強磁性的な性質である磁石を引きつける働きや安定して磁石を浮かせておく機構はない。しかし、常伝導部分は磁力線を通すこと、超伝導状態が磁力線を排除するために超伝導体に常伝導部分と超伝導部分が分布して磁束格子を作ったり、欠陥などのために磁束があちこちで止められる現象が起こる。この現象がピン止めと呼ばれる現象だが、今回は超伝導体に銀粉末を加えてピン止めを積極的に起こしたり、この仕組みを利用して磁石に一定の間隔を保って磁石が安定して浮く現象について理解を深める教材を開発した。

ここでは、まず超伝導の歴史的な背景と考え方、超伝導体の製作、磁石の間に働く力と超伝導体のようす、銅酸化物超伝導体に銀を添加した場合とそれをパイプ型に成型したものについて、デモンストレーションの方法等を報告する。

超伝導の背景

1908年ヘリウムの液化に成功したカマリング・オンネスは金属の電気抵抗が低温でどのようになるかを調べていてライデンコミュニケーションズ 122(1911)に水銀の抵抗が20 K付近で消失することを報告した。さらに、1933年マイスナーとオクセンフェルトは超電導になると磁場が金属に入り込めないマイスナー効果を発見した。これらの金属が低温で示す超伝導現象については1957年バーディーン、クーパー、シュリーファーらが提案したBCS理論によってよく説明できることが実証されている。

それから30年、1986年ベドノルツとミュラーが銅酸化物の超伝導体を発見し、これが、物理学の一大領域を作り、超伝導を一般市民も知ることになることとなった。

ヘリウム温度に近いところで金属の電気抵抗がゼロになる超伝導を従来型超伝導というが、超伝導は、量子力学的な状態がマクロに実現している現象で、古典物理に対して力学や電磁気学を使って説明したのと同じように量子力学を使って説明することになる。超伝導は電気抵抗が0になる現象だが、従来の金属中の電子の流れとは別の量子力学的な現象として考える。古典的な金属中の電子は周期的なイオンの振動や不純物によって散乱され、これが抵抗となる。したがって、温度が低くなってイオン振動が小

さくなっていくと純物質の場合抵抗が小さくなっていく。これに対し、不純物による散乱の影響はあまり温度変化しないために、ニクロム線は窒素で冷やしてもあまり抵抗が小さくならない。ところで、液体ヘリウムをポンプで引いて気化させてさらに冷やしていくと粘性を持たない超流動という現象が現れる。超流動は、低温でマクロな数のヘリウム原子が同じ量子力学的状態を占め、多くの粒子が1個の粒子と同じ状態となるために起こる現象である。オタマジャクシが沢山いる状態とイワシが群をなしている状態を比べると、小石投げ込んだときオタマジャクシは同時に同じ動きしないがイワシは群で同じように行動をするイメージがあるが、超伝導のイメージも似たように考えられ、電荷を持った粒子が、マクロに抵抗なく動くこととなる。しかし、パウリの原理として知られているように、電子はフェルミ粒子なのでそのままでは同じ状態になれない。そこで、電子の間に引力が働いて対になってボーズ粒子ができたとして、同じ状態をとれるようになり、超伝導が起る。状態変化が起こることとはその状態になった方がエネルギー状態が低くなり安定だからであるが、従来型超伝導体の場合は格子振動との相互作用からこのエネルギーの低下分を得ていることはBCS理論から分かっている。しかし、高

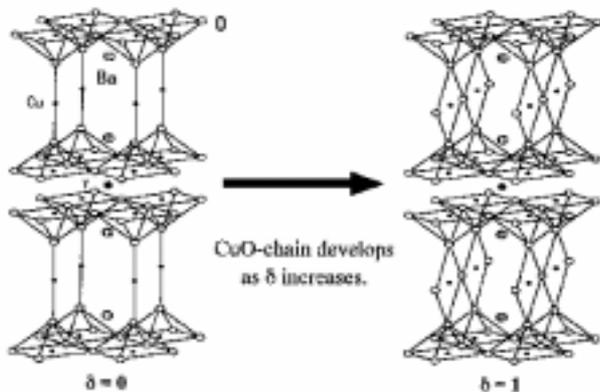


図1 YBCOの結晶構造

温超伝導の場合、電子が対になるための機構がどのようなになっておりエネルギーをどこから得

ることになるかは現在の最先端の研究領域である。

YBCOの構造と超伝導のキャリア

YBCOの母結晶は $YBa_2Cu_3O_6$ で、これに酸素が加わっていき、充分酸素が入ると $YBa_2Cu_3O_{6.7}$ となる。このとき、単格格子には銅と酸素の結合する CuO_2 面が2枚とCuとOが並んだCO鎖をもつ構造となる。CO鎖の酸素は解離しやすく、Oが6このとき約500Kのネール温度を持つ反強磁性絶縁体であったものが、Oが増えていくと金属的となり6.5付近で超伝導体となり、Oが7付近で超伝導転移温度は最大とる。これは、Oが6.5付近結晶を電氣的に中性を保つために不足の電子を CO_2 面内にあるO原子から1個奪うことで1個のホールが CO_2 面内に導入されるため、このホールがキャリアとなりペアを作って超伝導が実現する。

超伝導体の作製

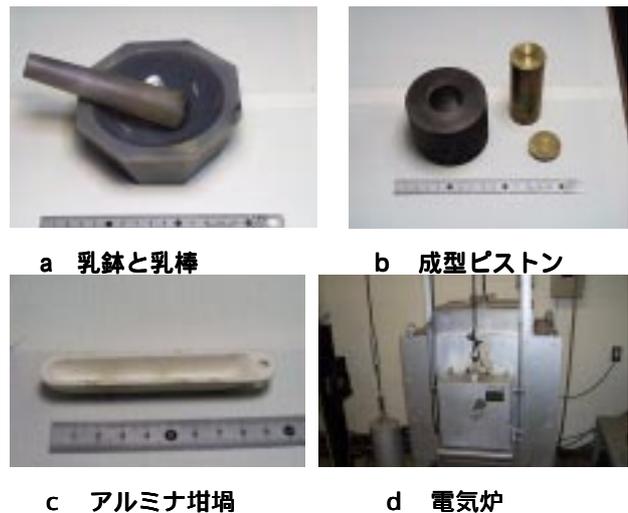


図2 結晶作成装置と器具

銅酸化物高温超伝導体の多結晶試料は固相反応法を用いて作成する。まず、酸化イットリウム Y_2O_3 、炭酸バリウム $BaCO_3$ 、酸化銅 CuO の粉末をY:B:Oのモル比が1:2:3になるように秤量して乳鉢と乳棒で2時間ほど混ぜ合わせる。乳鉢や乳棒は不純物が混入しないようにメノウ製を用いるのが理想だが、アルミナ製の磁性乳鉢でもよい。よく攪拌したらアルミナ製のボート型坩堝に粉末を入れて電気炉で約910℃で24時間

加熱する。このとき初めに2時間で500℃に上げて5時間ほど保持して水分を飛ばしてから3時間ほどかけて910℃に上げる。910℃が24時間経過したら12時間かけて室温まで下げる。これが仮焼きで、これによって $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ の微結晶ができることになる。

仮焼きでできた微結晶を再び乳鉢と乳棒で2時間程度擦り潰し、ステンレス製のシリンダーとピストンに詰めて、プレスで押し固める。プレスからそっと抜いた塊をアルミ製のボートを裏返しにして乗せ電気炉に入れる。

本焼きは2時間ぐらいで500℃まで上げて、5時間保持した後3時間程度で935℃まで上げて24時間焼く。6時間程かけて500℃まで下げ、そのまま24時間保持して酸素を充分供給する。その後6時間ほどで室温まで下げて炉から取り出す。取り出した試料の超伝導の判定は磁化率を測定することで調べることが出来る。磁化率は15ガウスの磁場中で量子干渉磁束計を利用して測定した。

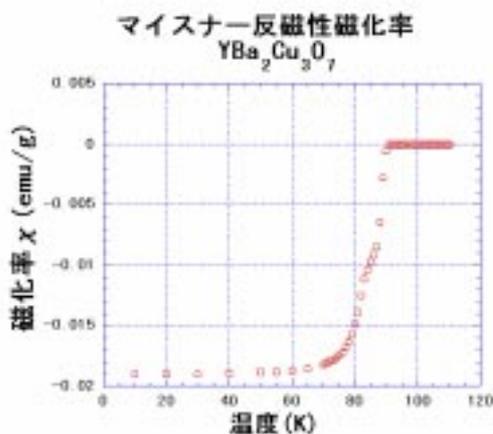


図3 作成したYBCOの磁化率の温度変化

ピン止めセンターの導入

上の方法で超伝導体を作った場合、マイスナー効果起きて磁石は浮かぶが、それが永久磁石のように引き付けることはない。ところが、マイスナー効果の起きない常伝導部分があったり、格子欠陥があったりすると磁力線がトラップされて永久磁石のような働きを示す。そのため、超伝導を壊さずにピン止めセンターだ

け導入する必要がある。また、超伝導体の単位体積あたりの密度を上げてトラップされる磁束を大きくするために銀粉末を添加して溶融させて再び結晶させた。



図4 プレス機械と大型試料用ピストン

銀粉末または、酸化銀粉末(3μm程度)を仮焼きして擦り潰したYBCOの粉末に質量%で5~10%程度加えて乳鉢で2時間程度かき混ぜる。これをシリンダーとピストンで加圧して成型して焼く。3時間で500度にして6時間水とばしをした後、3時間ほどで1050度に挙げ1時間保った後20時間ぐらいかけて900度まで落としその後3時間で500度に下げ12時間ほどかけて酸素を充分含ませて6時間ぐらいで常温に落とし製作する。このとき、高温のため結晶が一部融解し容器と反応してしまう。これを防ぐために別のYBCOで作った板をアルミボートの上に載せてその上に試料を載せて焼成する。焼き上がったときに載せていたYBCOの台も試料もかなり融解するが、完全に融けきらないので台は試料を融着しながらも試料は焼き上がる。イットリア坩堝や白金坩堝を利用するとこの問題は解決するが予算的に金額が高く今回は見送った。

超伝導体を用いたデモンストレーション

1. マイスナー効果

発泡スチロール容器に液体窒素を入れて超伝導体を冷やし、その上にネオジウム磁石を置く。磁石は反発して浮上する。同様のことは、浮かせる駒に比べて非常に大きい磁石の台を持つU-CASという磁気玩具の駒でも行うことが出来る。しかし、U-CASの場合は安定点を見つけるのが難

しく熟練を要する。これに対して超伝導体の場合も磁石に比べて大きい超伝導体を使うと容易に安定して浮上させることが出来る。

2. ピン止め効果



出来た超伝導体



カットして並べた超伝導体

図5 ピン止め効果のデモ実験装置

これは、磁石の反発力だけでは説明できない。そこで、超伝導体をたくさん準備してこれをバット型の発泡スチロール容器に並べる。充分液体窒素で冷やして、ネオジウム磁石を置くと、磁石は置いた超伝導体の隙間に寄せられて安定する。また、この隙間に沿ってはスムーズに運動することが出来る。マイスナー効果は磁力線が超伝導体内部に入り込まない現象と考えられるが、隙間の部分には充分よく通るということもできる。超伝導体には置かれた磁石と逆向きの磁界が発生して反発力を与えるが、隙間は磁力線が通るのでガイドの役割を果たすことになる。

この仕組みをマイクロな状態で起こしているのがピン止め現象である。イットリウム系の超伝導体に入れた銀粉末はちょうどこのような働きをする。高温超伝導体は通常不純物効果が大きく、不純物を混入すると転移温度が下がり反磁性の磁化率も小さくなるが、銀や白金は例外的に化合して構造やホール濃度を变化させないため、ピン止め材料として用いられている。

3. パイプ型超伝導体

中空部分のピン止め効果を利用して超伝導体を安定して浮かせないかと考えたのがパイプ型超伝導対である。レールはネオジウム磁石をスチール製円盤の上に3列に並べて円形にレールを造りこれを周回させることにした。ピン止めセンターを銀粉末で導入した超伝導体をグラス

ウールで包み、アルミニウム箔を巻いて液体窒素に漬けてから割り箸で挟んでレール上に置いたところうまく滑走させることができた。磁石を3列にしたのは磁力線の谷間を真ん中に作り滑走体はその谷間に落ち込んで外側に飛び出さない形となるためである。モノレール型コースターの滑走体として試作したが、逆にトラップされて動きが鈍くなってしまった。

今回は超伝導体の製作とその携帯についての教材開発を中心とし、その製作手法成型方法等について知見を得ることが出来た。



図6 滑走用モノレールと超伝導体

なお本研究は平成10年度ホクサイテック財団一般道民発明研究補助金の助成を受けて行ったものであり、ピン止め超伝導体の作成に関しては岩手高校の佐々木修一氏、製作装置と磁化率の測定実験については北海道大学大学院理学研究科の伊土政幸、小田研、桃野直樹、中野亨の各氏にご教示戴いた。ここで改めて感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 佐々木修一 科学技術体験活動ハンドブック (1995)
 - 2) 村上雅人 焼結と微構造 超伝導体の化学 97(1987)
 - 3) 田中昭二 高温超伝導 読売新聞社 (1991)
 - 4) 長岡洋介 高温超伝導 丸善(1995)
 - 5) Shinichi Goto and Kazuo Shiiki J.J.A.P. 34(1995)4760
 - 6) Xubuang Zheng et. al J.J.A.P. 33(1994)1309
 - 7) Wonback Kim et. al J.J.A.P. 33(1994)999
 - 8) Takashi Yamamoto et. al J.J.A.P. 32(1993)4496
 - 9) 内野倉國光他 高温超伝導の物性 培風館104(1995)
- (ながた としお 物理研究室長)
(おおくぼ まさとし 物理研究室研究員)
(むらかみ しゅんいち 物理研究室研究員)