

超伝導現象における磁力線観察

斎藤 吉彦*

概要

超伝導現象における磁力線観察の方法を与える。マイスナー効果とピン止め効果における磁力線の様子が、大型ネオジウム磁石とビニールタイの使用で、大きく観察することができる。

1. はじめに

超伝導の演示の多くは図1のように超伝導体¹と磁石とが反発する様子を見せるものである。これは「超伝導体を磁場中においてみると磁束は超伝導体内部に侵入しない。」というマイスナー効果の結果生ずる現象である。見学者にマイスナー効果を紹介するのは非常に難しいので、図1の現象をマイスナー効果と称してしまうことが多い。さらに超伝導現象を印象付ける演示で、超伝導体と磁石とが隙間をあけて、その相対的位置が固定される現象がある(図2)。これは図2(上)のように、高温超伝導バルク材を、上部にドーナツ形状のネオジウム磁石を配したまま冷却して実現したもので、磁力線のピン止め効果によって生ずる現象である。これまで超伝導現象の演示では、図1や図2のように超伝導体と磁石との相互作用が紹介されてきたが、磁力線を観察するものはなかった。

本稿では、マイスナー効果とピン止め効果における磁力線観察の方法を与える。

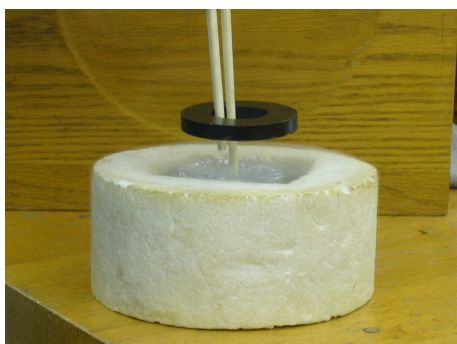


図1. 高温超伝導体がネオジウム磁石を反発する様子

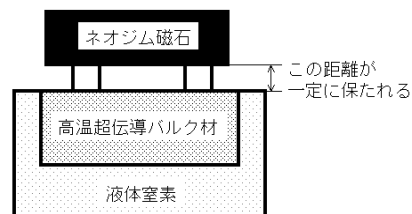


図2. 高温超伝導体を上図のようにして冷却すると、ピン止め効果により超伝導体と磁石の相対的距離が固定される(下図)。

* 大阪市立科学館 学芸課
E-mail: saito at sci-museum.jp

2. 磁力線観察

マイスナー効果を可視化したのが図3(動画は著者のwebサイト²を参照)で,大型ネオジム磁石³の上部に超伝導体⁴を置き,その近傍にビニールタイ⁵を配している。上図はビニールタイを超伝導体上部の亚克力板に配したもので,下図は多段の亚克力ケースにビニールタイを入れ,正面から見た様子である。いずれも,磁力線が超伝導体に浸入しないことを示している。マイスナー効果を可視化した演示はこれが初めてであろう。

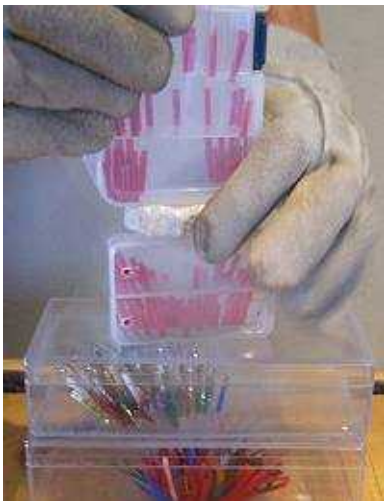


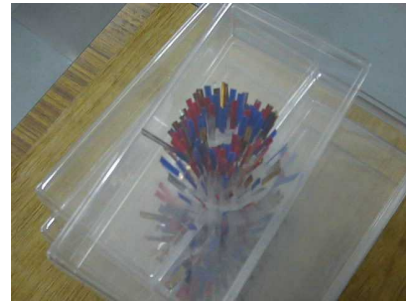
図3. マイスナー効果。超伝導体は大型ネオジム磁石の上部にあり,その近傍の磁力線の様子をビニールタイが描いた様子。上図は超伝導体の上に亚克力板を置き,ビニールタイをばら撒いた様子。超伝導体の上部にビニールタイが位置することがなく,超伝導体から磁力線が出ていないことが分かる。下図はビニールタイを入れた多段の亚克力ケースを超伝導体の上下に置いたところ。超伝導体近傍に磁力線のない事が分かる。

図2は磁力線のピン止め効果によって生じた現象である。ピン止め効果は,磁力線が存しない超伝導領域と磁力線に貫かれた正常領域の共存した状態で,磁力線がバルクの中で固定される現象である。この磁力線の様子を可視化したのが図4(a)で,大型ネオジム磁石の上部に図2の超伝導体を置いたときの様子である。

ドーナツ状に磁力線が貫いているのが分かる。ドーナツ形状のネオジム磁石の磁力線が超伝導体に「移植」されたと解釈できるであろう。「移植」された磁力線が固定されるので,図2のような奇異な現象が生じるのである。図4(a)~(c)(動画は著者のwebサイト²を参照)は液体窒素温度から室温になる過程で超伝導領域が消失する様子である。終状態は全ての領域が磁力線に貫かれており,バルク全体が正常状態になったことが分かる。



(a)



(b)



(c)

図4. ピン止め効果を示した高温超伝導バルク材が超伝導領域を消失する過程。(a)はピン止め効果を示した高温超伝導バルク材で,ドーナツ状の磁石の磁力線が「移植」されたことが分かる。室温雰囲気では温まると,徐々に磁力線に貫かれる領域が増大し(b),やがてバルク全体が磁力線に貫かれ,正常状態になる(c)。

3. まとめ

超伝導現象の演示は,図1のように磁石を反発する様子,図2のように超伝導体と磁石との距離が一定に保たれる様子,さらに磁石で作ったレールの近傍で超伝導体が浮いてジェットコースターのように宙返りなどをしながら滑走する様子など,意外性のある現象で見学者の興味を強く惹きつけている。しかし,超伝導現

象の本質からこれらの奇異な現象が考察されることはほとんどなく、リニアモーターカーの原理と誤解を与える場合が少なくない。超伝導状態は次の2つの性質で特徴付けられる。一つは完全導体(電気抵抗0)であり、もう一つマイスナー効果で、「超伝導体を磁場中においてみると、磁束は超伝導体内部に浸入しない。」という現象である⁴。この2つの特徴から上記の演示は考察されるべきであるが、それは見学者の知識や興味から乖離していることが多い。実際、著者は磁力線の振る舞いによる解説を試みてきたが、見学者にとって現実味のないものようであった。ところが、図3や図4を示すことが出来るようになったので、磁力線による現実味のある考察が可能になった。たとえば、図1に関しては図3を示すことで、「超伝導体が磁石を反発するのは、マイスナー効果によって超伝導体が磁石の磁力線を反発しているからである。」と解説できる。また、図2に関しては図4を示し、「ピン止め効果により、磁石の磁力線が移植され、その磁力線が変化しないように超伝導体と磁石の間の距離が一定に保たれている。」と解説できる。少なくとも奇異な現象の背景には、超伝導体固有の磁力線の振る舞いがあることが分かるであろう。また、大学での講義にも次のように有効であろう。マイスナー効果は次のロンドン方程式を仮定して導かれるものである。

$$\text{rot } j = -B \quad (1)$$

ここで、 j は電流密度、 B は磁束密度である。これは超伝導体表面に侵入した磁束密度とこの表面部分に流れる電流との関係を与える。バルク表面に生じる渦電流が、外部の磁束が超伝導体内部に侵入するのを妨げる。超伝導体は完全導体であるため、この渦電流を保つための仕事は不要で、永久電流となる。このような反磁性電流をイメージさせながら、図3や図4の磁力線を観察させることは非常に教育的である。さらに、図2のような現象を磁力線のエネルギーミニマムから考察するのは大学初学年の演習問題にも有効で、初学者に演習の動機を強く与えると思われる。

謝辞

新日本製鐵(株)先端技術研究所新材料研究部には、著者の演示構想に理解いただき高温超伝導バルクを提供いただきました。特に同社の手嶋英一氏には様々な相談に快く応じていただきました。厚く御礼申し上げます。

¹ 新日本製鐵(株)の CuBaDyO 高温超伝導材。本稿で使用されるのはこの超伝導体である。

² <http://www.sci-museum.kita.osaka.jp/~saito/>

³ 10cm 角、表面磁束密度は 0.5T。MRI に用いられるもの。磁石工房より入手可能。

⁴ 新日本製鐵(株)の CuBaDyO 高温超伝導材

⁵ 菓子袋などを閉じるのに使われるもので、カラフルな樹脂でコーティングした針金。見やすくするために、これを使用した。

⁶ 中嶋貞雄:「超伝導入門」培風館(1971)