

テクノフェスタin浜松：超伝導演示実験

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2018-06-14 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 増田, 健二, 芦澤, 雅人 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.14945/00025268

テクノフェスタ in 浜松：超伝導演示実験

増田 健二，芦澤雅人
技術部 プロジェクト・安全支援部門

1. はじめに

青少年の理科離れが学会やマスコミ等でも問題視されている。ここで取り上げる「高温超伝導」は、科学者・学生はもとより社会的にも大きな関心が寄せられているテーマである。酸化物高温超伝導体の発見¹⁾²⁾以来、学生実験で比較的手軽に超伝導実験ができるようになった。また、実験教材としても注目され、高温超伝導実験は1987年（30年前）に日本で一番初めに静岡大学が物理実験に取り入れており³⁾⁵⁾、テクノフェスタにおいても超伝導演示実験を1996年（第1回、22年前）から実施してきた。今日的な物理学の研究の一端を示す実験教材として高く評価されている。

先頃開催された小中高校生向けの科学実験をテーマとした「静岡大学第22回テクノフェスタin浜松」において「不思議な超伝導：液体窒素で遊ぼう」と題した演示実験を行った。実験は、超伝導体（YBCO系）を液体窒素（-196℃）で冷却して、強力なネオジウム磁石を使うと、磁石が超伝導体上に浮上する「磁気浮上」や発泡スチロール球上の磁石が超伝導体に吊り下がる「磁束のピン止め効果」の実験、また、30cmの磁石のレール上を浮上したまま車体（超伝導体）が左右に進む「リニアモーター」の実験である。その他、液体窒素（-196℃）による草花の瞬間凍結やフィルムケースロケットなど低温の世界を体験できる。

なお、高温超伝導の磁気特性を利用した演示実験は、地域貢献の一環として「静岡大学テクノフェスタ」の他にも、「青少年のための科学の祭典（静岡市科学館）」や「未来の科学者養成講座（JST）」などで演示実験を行っている。

2. 高温超伝導体試料の作成

物理実験に用いている固相焼結法によるYBCO系試料では、成分の酸化物粉末を必要量（Y:Ba:Cu=1:2:3）だけ混ぜ合わせ、940℃で10時間酸化した後、直方体状に加圧成型（400kgf/cm²）し、その後950℃で10時間にわたって焼結した（図1(a)）。また、演示に用いる半溶融凝固法によるYBCO系試料では、固相焼結法と同様に酸化した後、10%の銀粉を成分として添加した。加圧成型

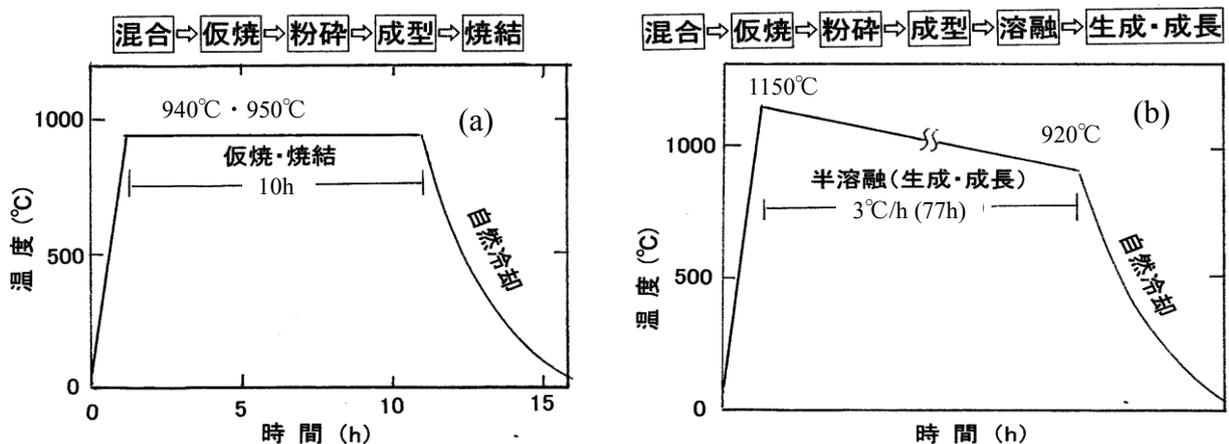


図1 高温超伝導体の作製方法 (a) 固相焼結法 (b) 半溶融凝固法

(400kgf/cm²)した成型体を1150°Cに加熱し半熔融させ、920°Cまで1時間に3°C(77時間かけて)徐冷した後、大気中で自然冷却した(図1(b))。この包晶反応によって、半熔融状態から超伝導相であるYBa₂Cu₃O₇(Y123)が生成される。そしてこの時、超伝導体の中に常伝導層である銀粉がピン止め点となり、液体窒素で冷却すると強い磁束のピン止め効果⁶⁻¹¹⁾が観測された。

3. 磁気浮上と磁束のピン止め効果



図2 磁気浮上



図3 磁束のピン止め効果

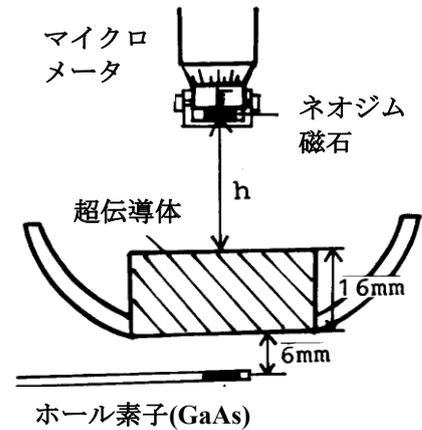


図4 磁場分布測定用装置

超伝導とは？ある物質が一定温度以下になると電気抵抗がゼロとなる現象をいう。例えば、超伝導体上に磁石をのせると磁石の磁力線に反撥する電流(反磁性電流)が超伝導体表面に流れ、磁石が空中に浮上させる(図2)。

磁石に反撥して浮上するのと反対に超伝導体が磁石を吊り下げるといふ磁束のピン止め効果の様子を図3に示す。発泡スチロール地球儀の先端の磁石を超伝導体に押し付けると磁束が超伝導体内部にトラップされ、磁石を吸引する磁性効果が生じる。

半熔融凝固法の超伝導体に磁石を近づけると、どのような現象が起きるのか、磁気浮上と磁束のピン止め効果の比較から調べてみた。図4のように、半熔融凝固法の超伝導体の表面上で磁石の高さ h を固定して、ホール素子プローブの位置を鉛直方向(xz 面)内で2次元的に動かして磁束密度の空間的变化を調べた。超伝導体表面の磁束密度 $B_s = 0.01\text{T}$ ($h = 5.5\text{mm}$)の時は、図5(a)のように、磁場ベクトルはすべて上向きの浮上磁石に反撥する(図2のように磁気浮上する)力が働いている。これに対して、 $B_s = 0.08\text{T}$ ($h = 1.5\text{mm}$)のときには $x = 6 \leftrightarrow -6\text{mm}$ 、 $z = 5 - 7\text{mm}$ の範囲で磁場

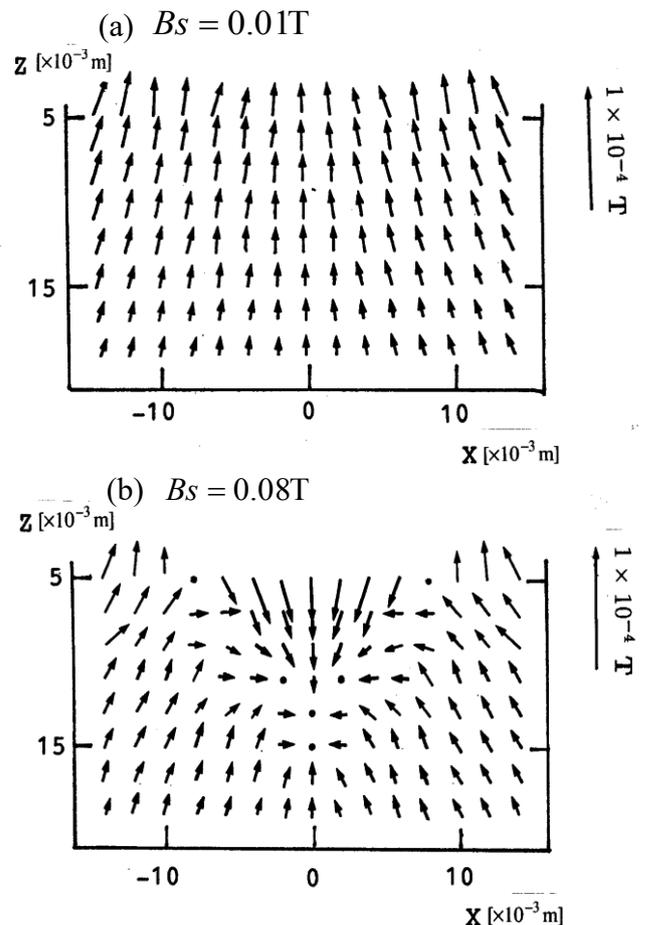


図5 半熔融凝固法超伝導体裏側の磁場分布(超伝導状態と常伝導状態の差分)

ベクトルが下向きになっており、磁石を近づけた中心軸付近での磁束の集中が確認された（図5(b)）。このことが、図3のように半熔融凝固法の超伝導体が磁石（発泡スチロール地球儀）を吊り下げる現象となっている。

おもちゃのリニアモーターを図6に示す。浮上する力は、磁石と超伝導体との反撥する力（マイスナー効果）を利用し、幅3cm、長さ30cmで角型ネオジウム磁石を鉄板上にN極を上向きにして貼り付けた線路上に超伝導体（車体）を浮上させる。推進する仕組みを図7に示す。ステッピングモーター動作原理を用い、超伝導体（発泡スチロールの車体）の上に励磁コイルをのせ、コイルに交流の低周波電流を流し、極性を時間的（4Hz）に切り替えることによって、その側面のN極S極を交互に貼り付けた磁石（1ステップ毎の磁場）に励磁コイルが吸引・反撥を繰り返す力によって推進する。

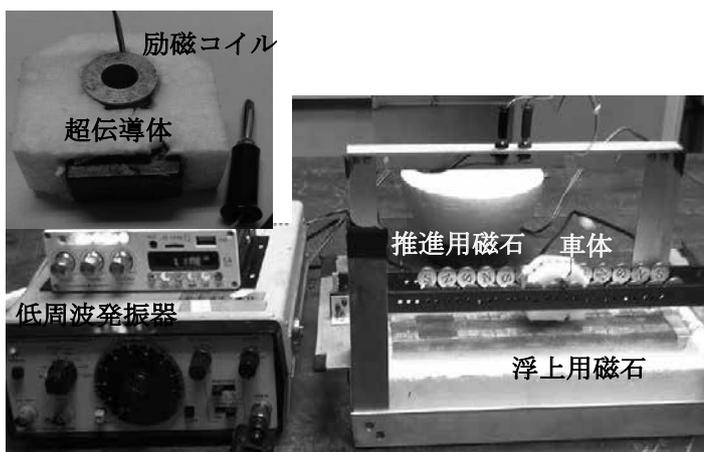


図6 おもちゃのリニアモーター

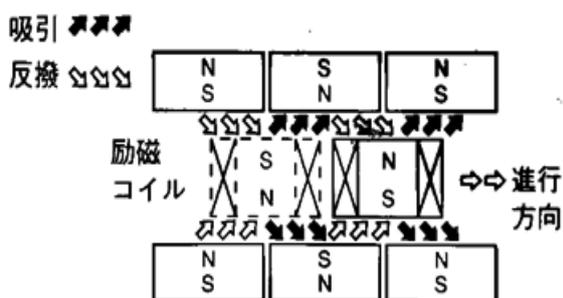


図7 推進する仕組み

4. 液体窒素を使った演示実験



図8 草花の瞬間凍結



図9 空気の液化



図10 フィルムケースロケット

液体窒素を使ったおもしろ実験として、草花の瞬間凍結（図8）、空気の液化（図9）、フィルムケースロケット（図10）を行った。瞬間凍結は、透明なデュア一瓶を用い、液体窒素が沸騰して煙を出しながら草花が凍っていく様子が観察できる。空気の液化は、ゴム風船を液体窒素に入れるとしぼんでいき、また、取り出すとミシミシと音をたてながら膨らむという子供たちに人気の実験となっている。フィルムケースロケットは、写真用のフィルムケースに液体窒素を少量浸み込ませたティシュペーパーを入れ、ふたをして容器内

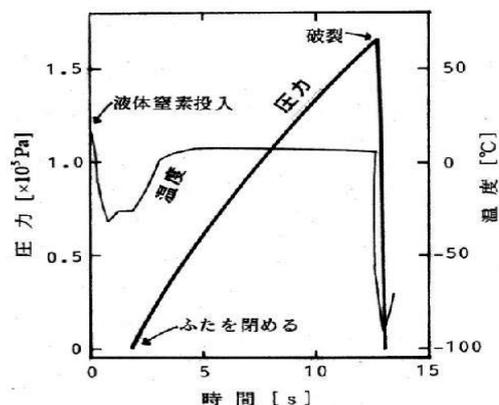


図11 フィルム容器内の圧力と温度変化

を密閉すると液体窒素が気体になり、破裂して飛び上がる。自作の発射台に取り付けるとフィルムケースはポンをいう音たてて5mくらい飛んでいく。

そこで、容器内の圧力と温度がどのように変化するか測定してみた。圧力測定は半導体圧力センサーを使用し、温度測定は応答時間の早い直径0.025mmのクロメル-アルメル熱電対を使用した。実験結果を図11に示す。液体窒素を湿らせたティッシュペーパーを入れると温度は30°Cくらい下がり、ふたを閉めると急激に圧力が上昇してついには破裂する。この間の温度は、6-7°Cと一定であり、温度上昇による体積変化ではなく、液体窒素が気体になることによって、体積が700倍に膨張して、瞬間的に $1.65 \times 10^5 \text{ Pa}$ の圧力(差)がかかって破裂したことが確かめられた。

5. まとめ

超伝導体による磁気浮上演示実験では、一般的な固相焼結法よりは熔融凝固法の方が、より効果的であることが報告されており、演示実験装置の開発と共に超伝導体試料の作製も試みた。

今回は、小中高校生向けの科学実験をテーマとした「静岡大学テクノフェスタ in 浜松」において、高温超伝導体の磁気特性をモチーフに演示実験を行った。強力なネオジム磁石が超伝導体の上に浮かぶ「磁気浮上」の実験に関しても、より高く浮上するということが面白さに直結しており、「磁束のピン止め効果」の実験においても、発泡スチロールの地球儀を吊り下げることで演示効果を高めた。また、リニアモーターもどちらかと言えば機械的に精巧にできたモデルといえるものではないが、科学のおもしろな観点から見て面白く、だれもが楽しめるということに主眼をおいて製作した。

なお、高温超伝導の磁気特性を利用した教具は、本学の2年次物理学実験はもとより、「青少年のための科学の祭典(静岡市科学館)」や「未来の科学者養成講座(JST)」などで演示し、今日的な物理学の研究の一端を示す教材として有効に活用している。

終わりに、高温超伝導の教材開発の研究は、平成4年度、平成5年度、平成9年度および平成16年度の日本学術振興会科学研究費の奨励研究(B)および奨励研究の助成を受けた。

参考文献

- 1) J. G. Bednorz and K. A. Muller, Z. Phys. B64, 189 (1986)
- 2) P. Chu et. al., Phy. Rev. Let. **58** (9): 908 (1987)
- 3) 物理実験指導書：静岡大学教養部物理教室編 15 訂版, 215 (1988～)
- 4) 長島弘幸, 増田健二, 中原幹夫：静岡大学教養部研究報告(自然科学編) 26, 21 (1990)
- 5) 長島弘幸, 増田健二, 中原幹夫, 佐藤信一：物理教育 39-1, 1 (1991)
- 6) 村上雅人：パリティ 6(5), 56 (1991)
- 7) 村上雅人：物理教育 43-1, 1 (1995)
- 8) 増田健二, 久世宏明：応用物理教育 19-2, 43 (1995)
- 9) 増田健二：静岡大学工学部研究報告 48, 47 (1997)
- 10) 増田健二, 鈴木三男：物理教育 53-3, 195 (2005)
- 11) 吉田健一：物理教育 55-3, 215 (2007)