

## 物理実験の教材開発と超伝導実験の紹介

著者	増田 健二
雑誌名	技術報告
巻	18
ページ	1-6
発行年	2013-03-12
出版者	静岡大学技術部
URL	<a href="http://doi.org/10.14945/00007099">http://doi.org/10.14945/00007099</a>

# 物理実験の教材開発と超伝導実験の紹介

増田健二

プロジェクト・安全支援部門

中高校生の理科（物理）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・学生は基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。また教材としても注目され、静岡大の物理実験では 1987 年から取り入れられており、人気の高い実験種目となっている。また、静岡大テクノフェスタ in 浜松や先頃では JST の未来の科学者養成講座（藤間教授代表）においても演示実験等を行った。高温超伝導体の電氣的・磁氣的特性と実験内容について紹介する。高温超伝導体の磁気特性の応用に際しては、磁束のピン止めに起因する反撥力および抵抗力についての知見が必要とされる。本研究では、高温超伝導体の磁気特性として、超伝導体が外部磁場を打ち消す力を定量的に測定する。さらに、超伝導体が磁石（発泡スチロール地球儀）を吊り下げる磁束のピン止め効果の実験、ステッピングモータ動作原理を用いたリニアモーターの実験などの演示実験を紹介する。

## 1 はじめに

静岡大学教養部では、1987年度より工学部・理学部・農学部の 2 年次の物理実験で実施しており、年間のべ950人の多人数にのぼる学生に超伝導実験を行ってきた<sup>1-3)</sup>。実験は、1 回（1 日）限りで、時間も3-4時間であるので試料作成から始めず、こちらで作成した試料の電気抵抗率の温度変化の測定、磁気浮上（マイスナー効果）の観測を行っている。今回は、この高温超伝導実験を学生実験に導入するにあたり担当した技術的なこと、特に学生実験用装置の製作、酸化物超伝導体試料作製、および、磁気浮上実験などの磁氣的性質の説明方法<sup>4-6)</sup>について報告する。

現在の工学部の 2 年次物理化学実験は、2007 年度から物理実験 7 回+化学実験 7 回+ガイダンス 1 回の半期 15 回で展開している。物理実験は、12 人で 1 班を作り 2 人 1 組で 1 つの実験装置を使用する。1 クラスは最大 168 人（14 班×12 人）で 4 クラス（4 学科+再受講生）合計約 600 人が受講している。1 つの実験種目で原則として 24 人（2 班）12 セットの装置が用意されているが、「電子の比電荷」と「 $\beta$  線の計数測定」は 12 人（1 班）6 セットの装置となっている。物理実験の種目と担当者の分担表を示す。独自の教材開発種目としては、「超伝導」「磁束密度」「落下運動」「連成振動」「レーザー光回折」の 5 種目であり、残りの 3 種目についても測定法・装置の改良およびテキスト作成等を行っている。教材開発した種目の中で「超伝導」実験を紹介する。また、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、1996 年から 9 回に渡って展示を行い、JST の「未来の科学者養成講座（藤間教授代表）」においても、2011 年から演示実験等を行っている。

表 1 物理実験担当種目

教員担当種目	技術職員担当種目	TA担当種目
超伝導	連成振動	分光器によるスペクトル測定
磁束密度	レーザー光の回折	電子の比電荷
落下運動	$\beta$ 線の計数測定	

## 2 電気抵抗率の温度変化の測定用装置の製作

物理学生実験は、24人で1班を作り、2人1組で1つの実験装置を使用する。そのため実験装置は12セット必要となり、装置を製作する場合には、学生にも簡単に操作できることはもとより、できるだけ安価で製作することが必要となる。今回の高温超伝導実験の電気抵抗率の温度変化の測定装置で工夫したことは、学生にも簡単に操作できる試料ホルダーを製作したことである（図1）。この試料ホルダーは、試料の温度分布の均一性をよくするため試料を5mm程度の銅で囲んであり、ホルダー下部の銅ブロックが液体窒素表面に浸っている状態の時に転移温度近く(100K程度)になるように設定してある。そして、転移温度付近の電気抵抗率の急激に変化する部分では、ステンレス製デュアー瓶を伸縮架台に載せ、上下させることによって微妙な温度設定ができ容易に測定できる。電気抵抗率は四端子法を用い、図1-右のように、直方体試料の両端A, Bから電流 $I$  (10mA)を流し、C, D端子で電圧 $V$ を測定し、オームの法則 ( $R=V/I$ ) より抵抗 $R$ を求める。そして、試料の断面積 $S$ と電圧端子間の距離 $l$ より電気抵抗率 $\rho(\rho=SR/l)$ を求める。温度の測定は、クロメル-アルメル熱電対を用い、絶縁のためテフロンチューブに入れ、試料下(1mm程度削った)ベーク板にエポキシ系で接着した。較正は、金・鉄-クロメル熱電対(大阪酸素工業KK製)で行った。図2に測定系を示す。熱電対の出力電圧および試料の電圧端子からの電圧は、チョッパー型増幅器(MAX432CPA)で各々100倍, 33倍(クロメル-アルメルの熱起電力が1mV/Kとなるように)増幅したのち、デジタルテスター(感度100 $\mu$ V)で測定する。なお液体窒素デュアー瓶は、安全性のためにステンレス製(1l)を用いた。

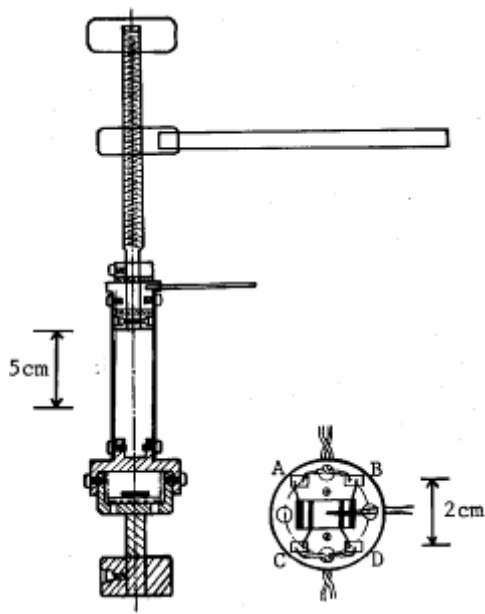


図1 試料ホルダー

高温超伝導試料としては、物理実験で使用しているYBCO ( $Y_1Ba_2Cu_3O_y$ ) の高温超伝導体を作成した。図3にYBCO超伝導体の電気抵抗率の温度依存性のグラフを示す。

固相凝結法によるYBCO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、空气中、920 $^{\circ}$ Cで10時間酸化した後、円盤状に加圧成型 (400kgf/cm $^2$ ) し、

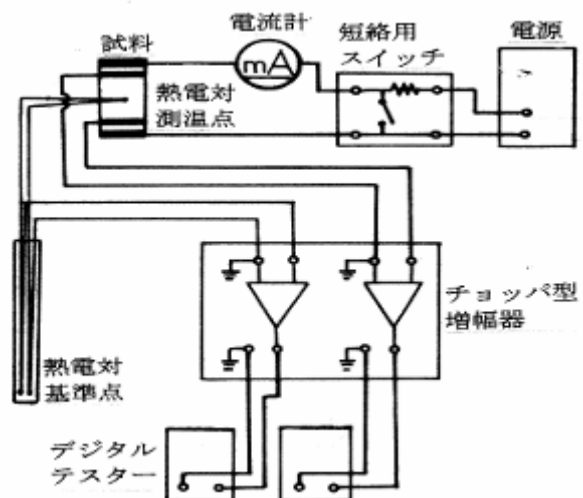


図2 電気抵抗の測定系

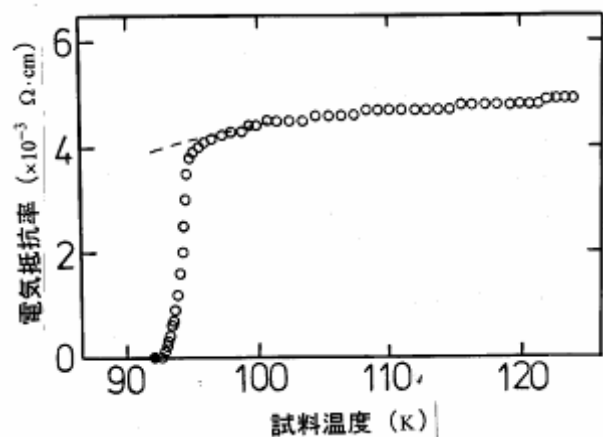


図3 電気抵抗率の温度依存性

その後、940°Cで10時間にわたって焼結した。半熔融凝固法によるYBCOでは10%の銀粉を成分として追加した。上と同様に酸化した後、加圧成型した円盤を1150°Cで30分半熔融させ、その後、900°Cまで10°C/hで徐冷した。すなわち、1150°Cから25時間かけて250°C徐冷した後、大気中で自然冷却した。この試料を冷却すると、強い磁束のピン止め効果<sup>7)</sup>が観測された。(一例として、超伝導体を液体窒素で予め冷やしておく、その下に磁石を吊り下げることができる。)

### 3 磁気鏡像と磁場分布

簡単な計算と、ホール素子を利用したガウスメータによる測定によって、磁気浮上(図4)についてもう少し定量的に調べてみよう。まず、磁気鏡像の計算では、超伝導体の表面に平行に厚さ $t$ の円筒磁石を置き、超伝導体表面と磁石の下面の距離を $h$ とする。扱いを簡単化するため、ネオジウム磁石(Nd-Fe-B、直径14.5mm、厚さ6mm、表面磁場0.3T)を円形環電流(面積 $S$ 、電流の大きさ $I$ )からなる磁気モーメント $p=SI$ として考える。磁石表面からの距離 $z=10\text{mm}$ の位置における中心軸上の磁場の大きさが $B=0.049\text{T}$ であることから、 $p=0.81\text{Am}^2$ とするのが適当である。表面の上側に $p_1=p$ があり、下側に鏡像として $p_2=\alpha p$ が生じるものとする。これらに作用する力が、磁石に働く重力 $mg(m=7.15\text{g})$ と釣り合うことから、

$$mg = \frac{3\mu_0\alpha p^2}{32\pi\left(h + \frac{t}{2}\right)^4} \quad (1)$$

となる。 $S=167\text{mm}^2$ 、 $h=10\text{mm}$ 、 $t=6\text{mm}$ であるとして $\alpha$ を求めると、 $\alpha=0.081$ となる。すなわち、仮に磁気鏡像を考えて磁石の浮上を説明しようとすれば、完全な鏡像の約8%の大きさのものが生じているとすればよい。(逆に $\alpha=1$ と仮定すると $h=21\text{mm}$ が得られ、磁石ははるかに高く浮上することになる。また、この磁石を2個用意して磁極間の反発で磁気浮上させたとき、向かい合う面の間隔が42mmとなることを用いると $p=0.79\text{Am}^2$   $\alpha=0.086$ が得られる。)

次に、アクリル製の支えを作り、超伝導体(直径30mm、厚さ15mm)の上方 $h=10\text{mm}$ の位置に磁石を固定して、超伝導体の下側での中心軸上の磁束密度の大きさをガウスメータによって測定した(図5)。

このとき、液体窒素(発泡スチロール)容器の底を削って平にし、ガウスメータのプローブを超伝導体に近づけやすくした。超伝導体の底面から下方への距離を $z$ とすると、 $z=5\text{mm}$ から $z=30\text{mm}$ まで測定を行った。試料としては、固相法試料と半熔融法試料を用い、磁石を置かない状態で液体窒素を注ぎ、十分冷えた後に磁石を所定の位置に置いた(ゼロ磁場冷却)。いくつかの $z$ の値に対する結果を表2にまとめて示す。括弧内の数値は、試料が超伝導状態のときと常伝導状

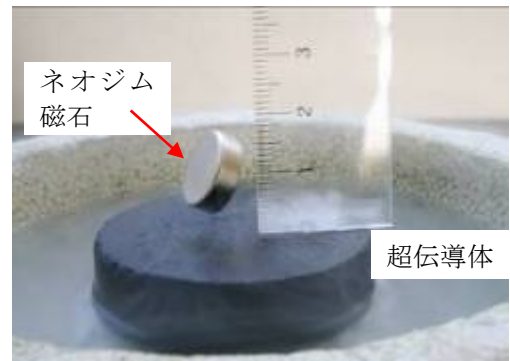


図4 磁気浮上(固相法( $\phi 50\text{mm}$ )超伝導体上にネオジウム磁石が浮上)

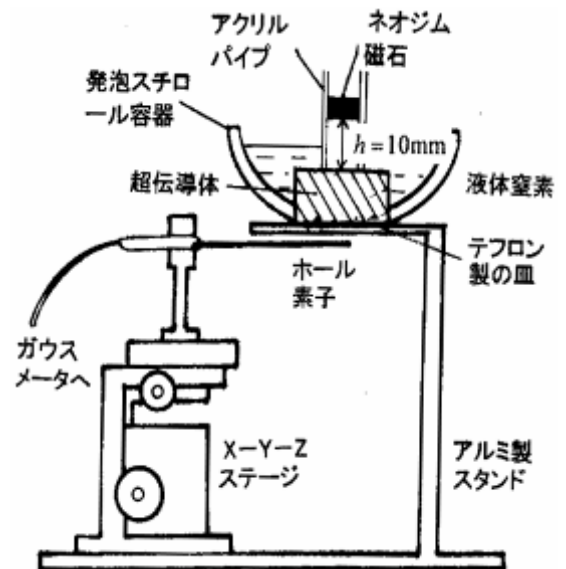


図5 超伝導体表面上の磁石とプローブによる磁場の測定

態のときの測定値の比を百分率で表した。

この結果から、固相法試料では中心軸付近での評価として、約95%の磁束がそのまま通り抜けていることが分かる。また、半溶融法の試料では、超伝導体のすぐ下側で常伝導状態と比較して磁束が増加していることが知られる。物理実験においてネオジウム磁石が固相法によるYBCO試料上に浮上しているとき、95%程度の磁束は

試料を通り抜けていると言えよう。以上に述べた第1の実験の場合、磁石の直径(14.5mm)に対して超伝導の直径(30mm)および厚さ(15mm)は十分に大きいとはいえず、したがって、超伝導体が有限の大きさである効果が現れる恐れがある。そこで、第2の実験(図6)として、厚さ1.5mmの板状のネオジウム磁石を一辺の長さが4mmの正方形にカットし、磁石と超伝導体表面の間隔 $h$ を1.5-10mmとして同様の実験を行った。この小磁石の表面磁場は約0.15T、磁気モーメントは $0.0135\text{Am}^2$ である。小磁石はマイクロメータの先端に接着し、距離 $h$ を0.05mmの精度で制御した。ガウスメータのプローブを超伝導体の下方 $z=5\text{mm}$ に保ち、 $h$ を変化させて中心軸上の磁束密度を測定した実験の結果を図7に示す。横軸は超伝導体表面における中心軸での磁束密度の大きさ $B_s$ で、これは表面に入って来る磁束線の本数の目安となる。 $B_s=800\times 10^{-4}\text{T}$ が距離 $h=1.5\text{mm}$ に、また、 $B_s=100\times 10^{-4}\text{T}$ が $h=5.5\text{mm}$ に対応している。

この実験の場合、超伝導体試料に比べて十分に小さな磁石を用いているため、裏側での磁束密度は約 $2\times 10^{-4}\text{T}$ と小さな値となっている。図7から分かるように、この場合もやはり、磁石の磁場は超伝導体試料を通り抜けてくる。固相法試料を通り抜ける磁場の大きさは、常に常伝導状態よりもわずかに小さくなっている。半溶融法試料においても、表面での中心軸磁束密度 $B_s$ が $250\times 10^{-4}\text{T}$ 程度までは同じことがいえるが、 $B_s$ がこれよりも大きくなると、通り抜ける磁場は常伝導状態と比べて大きくなる。これは、表3に現れた傾向と同じである。すなわち、半溶融試料では、入ってくる磁束が多いと中心軸への磁束の集中が起こる。この部分では、透磁率が見かけ上増加しているわけで、これはいわゆるピン止め効果で強磁性的な振る舞いが観測されることに対応している。

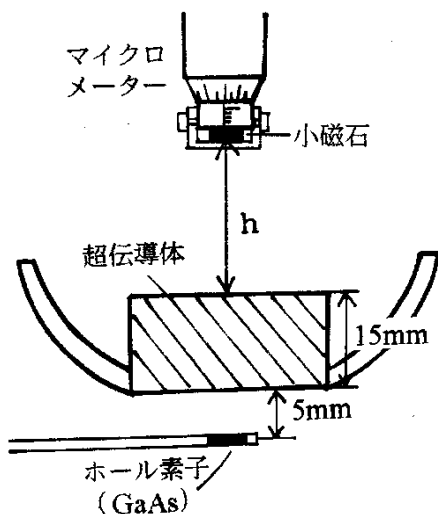


図6 超伝導体を通り抜ける磁束および試料裏側の磁場分布の測定

表2 超伝導体資料下方の中心軸上の磁場

z(mm)	常伝導	固相法 (%)	半溶融法 (%)
6	33.0	31.3 (94.8)	33.5 (101.5)
8	28.4	26.7 (94.0)	28.5 (100.4)
10	24.3	23.0 (94.6)	24.0 (98.8)
20	12.3	11.9 (96.7)	11.8 (95.9)
30	7.3	7.0 (95.9)	6.7 (91.8)

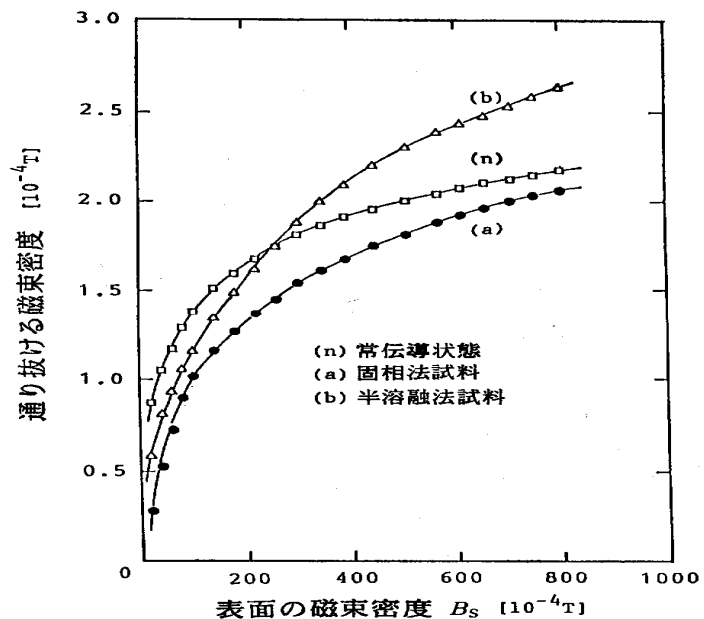


図7 超伝導体を通り抜ける磁束(中心軸上)

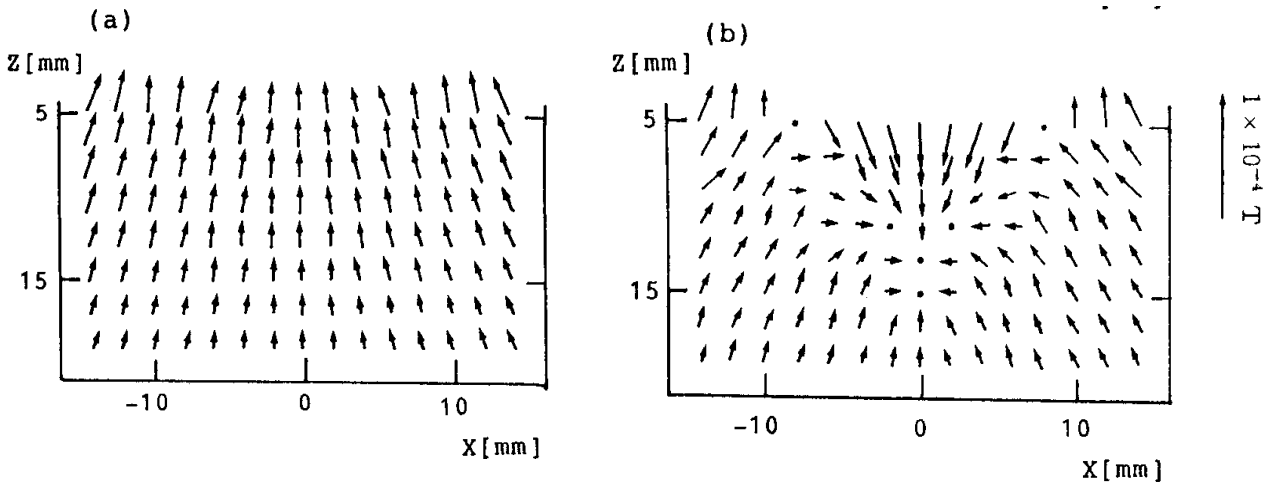


図8 半熔融法試料裏側の磁場分布（超伝導状態と常伝導状態との差

(a)  $B_s = 0.010\text{T}$  (b)  $B_s = 0.080\text{T}$

以上の実験は中心軸のみに関するものであったが、それでは、そのまわりの磁束密度の分布についてはどうであろうか。これを調べるため、今度は第3の実験として、超伝導体表面上で小磁石の高さ  $h$  を固定して、ホール素子プローブの位置を鉛直面 ( $xz$  面) 内で2次的に動かして磁束密度の空間変化を調べた。半熔融法試料について、 $B_s$  が  $0.010\text{T}$  と  $0.080\text{T}$  のときの結果を図8に示す。図には、試料が超伝導であるときと常伝導であるときの差をベクトルで表示してある。図7で、 $B_s$  が  $0.010\text{T}$  のときは試料は見かけ上、弱い半磁性を示しているが、これに対応して、図8 (a)ではベクトルはすべて上向きである。これに対して、 $B_s$  が  $0.080\text{T}$  (図8 (b)) のときには、 $Z = 5\text{--}7\text{mm}$  の範囲でベクトルが下向きになっており、したがって、中心軸付近での磁束の集中が確認される。

#### 4 演習実験への活用

図9のように、より演習性の高い、磁束のトラップ現象を示す実験を紹介する。半熔融法超伝導体にネオジム磁石を押し付けて引き離すと、発泡スチロール球（地球儀）が超伝導体とは少し離れた位置に吊り下がる。この現象は第3節で述べたように、強力なネオジム磁石をかなり強い反発力を感じながら超伝導体に押し付けると、中心軸付近でピン止め点といわれる超伝導でない部分（銀粉）に磁束が集中し、すなわち、この部分では透磁率が見かけ上増加する。これは、強磁性的な振る舞いが測定されたこと（図8 (b)) に対応しており、いわゆる「磁束のピン止め効果」の現象となっていることが説明できる。



図9 磁束のピン止め効果の演習

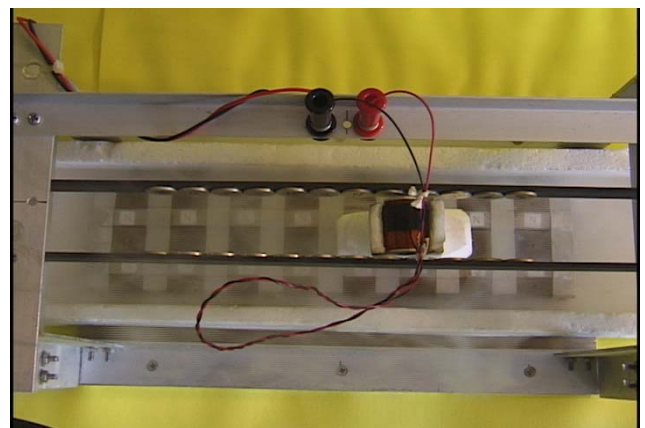


図10 リニアモータの演習装置

静岡大学テクノフェスタ in 浜松や科学の祭典静岡大会の演示用に製作したリニアモータの写真を図 10 に示す。図 11 のように、角型ネオジウム磁石（表面磁場 0.3T）を鉄板上にN極を上向きにして、20mm の幅で平行に貼り付けた（ネオジウム磁石は液体窒素に浸っている）。磁石と超伝導体との反磁性効果による反撥力で浮上する。超伝導体は保温のため発泡スチロールで覆い、その上に励磁コイルをのせる。推進力としては、図 12 のようなステッピングモータ動作原理<sup>8)</sup>を用い、励磁コイルに交流の低周波電流を流し、極性を時間的に切り替えることによって、その側面に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・反撥を繰り返すことによって推進させる。側面に貼り付けた磁石面とコイル面の距離は左右 5mm でコイル面における磁場は 0.12T となる。また、2Hz 程度が最もスムーズに走行する。

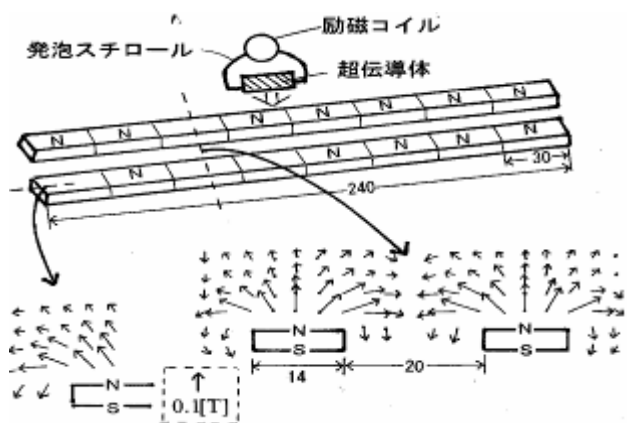


図 11 浮上する仕組み

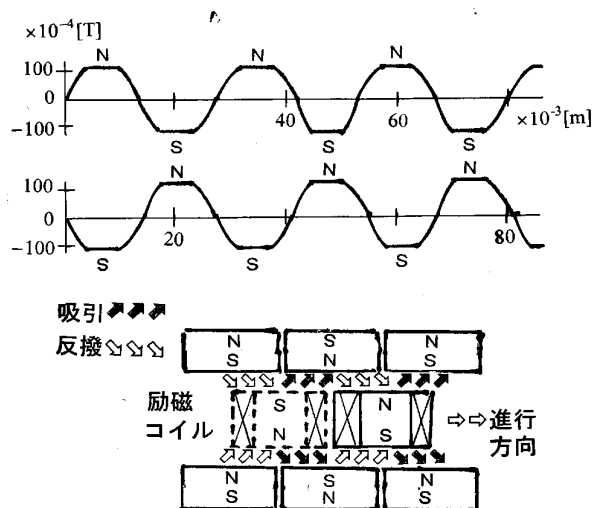


図 12 推進する仕組み

## 謝辞

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および奨励研究(B)の補助を受けた。

最後に、1987 年に静岡大学（教養部）2 年次物理実験超伝導実験を導入し展開するのに際しては、長島弘幸教授（現：静岡大学名誉教授）、久世宏明助教授（現：千葉大学教授）、中原幹夫助教授（現：立命館大学教授）、佐藤信一助手（現：理学部教授）がそれぞれの専門に基づいて役割分担して行った。

## 文献

- 1) 「物理実験指導書」静岡大学（教養部）物理教室（1987～2006）215-227
- 2) 「物理学実験」学術図書出版社 静岡大学工学部共通講座物理（2007～2012）78-94
- 3) 長島弘幸，増田健二，中原幹夫，佐藤信一：物理教育 39-1 (1991) 1-6
- 4) 増田健二，久世宏明：応用物理教育 19-2 (1995) 43-50
- 5) 増田健二：工学部研究報告 48 (1997) 47-53
- 6) 増田健二，鈴木三男：物理教育 53-3 (2005) 195-200
- 7) 村上雅人：物理教育 43-1 (1995) 1-3
- 8) 岩田章，佐治吉郎：「電磁推進の科学」朝倉書店 (1991) 153-156