高温超電導体を用いた軟磁性体の浮上

正員 筒井 幸雄 (神奈川科学技術アカデミー, 安川電機)

正員 樋口 俊郎 (神奈川科学技術アカデミー, 東京大学)

Suspension of Soft Magnetic Materials Using High T_c Superconductors

Yukio Tsutsui, Member (KAST, Yaskawa), Toshiro Higuchi, Member (KAST, Univ. of Tokyo)

This paper describes a novel suspension technique using high T_c superconductors and magnetic materials. For a field-cooled superconductor and an adjacent magnetic material, it was found that the usual inverse relationship between the attractive magnetic force and gap distance reverts to a direct relationship for small gap length. Thus, stable, non-contact suspension is possible within a certain gap range. This phenomenon was found for even a soft magnetic material possessing a minimal coercive force. Since remarkable reversals were observed for magnetic materials with diameters much smaller than that of the pinned area, it is considered that some of the pinned flux is subject to a "gathering effect" in the magnetic material. Stable, contact-less suspension of a 180g carbon steel weight under a high T_c superconductor was achieved using this technique.

キーワード：高温超電導体, ピン止め, 絞り, 復元力, 永久磁石, 軟磁性体

1. はじめに

高温超電導体と永久磁石を組み合わせ、超電導体の強力なピン止め力を活用することで、無制御で安定な非接触磁気浮上が可能であることは広く知られている⁽¹⁾。しかし、実際に超電導浮上装置を開発するためには、高温超電導体を持つ磁気力特性を詳細に把握することが必要不可欠である。そこで筆者らは、能動形磁気浮上機構⁽²⁾をセンサとして用いた多自由度の力測定方法を提案し、高温超電導体と永久磁石間の浮上剛性及びダンピング特性の多自由度評価に取り組んでいる⁽³⁻⁵⁾。

本報告では、新たに発見した『磁束を絞る形状を持つ磁性体と磁場中冷却した高温超電導体との間の磁氣的吸引力の増減が、あるギャップ長を境に逆転する』という現象と、この現象を利用した『高温超電導体を用いて、永久磁石でない磁性体を吸引浮上する』という新しい磁気浮上の方法を紹介する。

ピン止め効果により高温超電導体の近傍で永久磁石が安定に浮上するという現象は、永久磁石の磁束を高温超電導体がピン止めし、かつその状態を維持しようとすることから起こる現象であると説明されている⁽⁶⁾。これは、永久磁石の位置変化により高温超電導体のピン止め磁束の分布が変わるのを拒むために力が発生する、と見なすこともできる。すると、必ずしも永久磁石を用いなくても、高温超電導体のピン止め磁束分布に外部から変化を与えてやれば同様の効果が得られるのではないかと考えられる。そこで筆者らは、高透磁率の磁性体で高温超電導体のピン止め磁束を絞る方法を用いた実験を行い、この考えが妥当であ

ることを確認した。また、この方法を用いることで、軟磁性体でも安定な非接触浮上が可能であることを実証した。

2. 軟磁性体を浮上させる原理

2. 1 復元力の発生原理

まず、超電導体のピン止め磁束に変化を与える方法と、これにより磁氣的復元力が発生する原理を説明する。図1に、磁場中冷却後の高温超電導体に磁性体円柱が接近する過程でのピン止め磁束分布の概念図を示す。同図は、高温超電導体と磁性体円柱先端部間のギャップ部を拡大したものである。

まず、永久磁石を用いた磁場中冷却直後、高温超電導体には(a)に示すように磁束がピン止めされているとする。ここに先端が小径の磁性体円柱を近付けると、(b)に示すようにピン止め磁束の一部が磁性体円柱を貫き、高温超電導体と磁性体円柱との間に磁氣的吸引力が発生する。続いて(c)のように磁性体円柱を近付けると、これを貫く磁束が増加し、吸引力が増大する。更に磁性体円柱を近付ける場合、高温超電導体の外側にピン止めされた磁束が磁性体円柱を貫くためには、ギャップ中で大きく歪まなければならない。しかし、超電導体内で磁束は強固にピン止めされており、ギャップ内で磁束は極端に歪むことができないため、(d)のようにそれまで磁性体円柱を貫いていた磁束の一部が外れてしまう。このとき磁性体円柱を貫く磁束数が減少し、従って磁氣的吸引力の減少が起こる。このように、超電導体の近傍では磁性体円柱の接近に伴い磁氣的吸引力が減少し、復元力が発生する。

図1 磁性体の接近によるピン止め磁束の変化
(a)磁場中冷却直後, (b)~(d)磁性体の接近
Fig.1. Schematic images of the flux distribution.
(a)After field cooling. (b)~(d)Approach of the
magnetic material, in order.

2. 2 吸引力の測定方法

前述の方法で実際に磁氣的吸引力が減少することを確認するため、超電導体と磁性体との間の、空隙長に対する双方間の吸引力の変化を測定した。図2に、実験に用いた装置の概念図を示す。実験試料として、寸法が $40\text{mm} \times 15\text{mm}^t$ のY-Ba-Cu-O系溶融形高温超電導体と、先端部15mm長の部分の直径を $\phi 4\text{mm} \sim 18\text{mm}$ (2mmとび)に加工した、全長 $70\text{mm} \times \phi 20\text{mm}$ の磁性体円柱を使用した。先端部以外は、磁路兼磁性体を浮き上がらせないためのおもりとして働く。磁性体円柱の材質は、入手と加工が容易な炭素鋼(S45C)を用いた。超電導体を収める保冷容器は、側面を 20mm^t のベークライト板、底面を 0.4mm^t のステンレス板で製作した。

図2 吸引力の測定装置

Fig.2. Schematic illustration of the experimental apparatus.

実験前の準備として、超電導体を挟む形で上と下に $\phi 20\text{mm} \times 15\text{mm}^t$ のSm-Co系円盤形永久磁石を1個ずつ配置した状態で、保冷容器内に固定した高温超電導体を液体窒素で臨界温度以下に磁場中冷却し、磁束をピン止めした状態、いわゆる"高温超電導永久磁石"⁽⁷⁾の状態にする。続いて、超電導体下側の永久磁石を取り外し、この部位付近に先端部が来るよう磁性体円柱を配置する。磁性体円柱は、歪みゲージ式力センサーを用いて製作した荷重測定装置に固定しており、磁性体円柱の重さを随時観測している。磁性体円柱に超電導体が接近し、超電導体にピン止めされた磁束が磁性体円柱を貫くと、2者の間に磁氣的吸引力が発生し、磁性体円柱が上向きに引っ張られる。このとき荷重測定器の指示値が減少するが、これと円柱の本来の重さとの差を取ることで、超電導体と磁性体円柱との間に働く吸引力を得ることができる。

この測定を、先端部直径が異なる各磁性体円柱について、

超電導体を低速度で近付け、次いで遠ざける過程で行った。また、高温超電導体を最接近させた直後に微小距離(0.4mm)遠ざけ、再び同距離近付ける過程を設け、微小変位時の吸引力変化も同時に測定した。

2. 3 吸引力の測定結果

図3に、先端部直径が $\phi 4\text{mm}$ の磁性体円柱を用いた場合の吸引力変化曲線を示す。(a)は全過程での吸引力変化、(b)は(a)の小ギャップ部分を拡大したもので、共に横軸は超電導体の下面から磁性体円柱先端までのギャップ長、縦軸は磁氣的吸引力を表す。

図3 ギャップ長に対する吸引力変化
(a)全過程、(b)拡大

Fig.3. Magnetic force versus gap length curve.
(a)Whole process. (b)Partial magnification.

図3(a)から、磁性体円柱に高温超電導体を近付ける過程において、ギャップ長が50mm→2mm付近までは、通常の永久磁石と磁性体とが近付いた場合と同様に吸引力が増加していくが、ギャップ長がこれよりも小さくなると逆に減少することがわかる。磁性体円柱から高温超電導体を遠ざける過程でも同様に、ギャップ長が0.5mm→2mmの範囲で吸引力が増加し、その先は減少している。また全過程を通して、超電導体と永久磁石とを組み合わせした場合と同様、磁気力

変化にヒステリシスが見られる。更に(b)から、近付ける過程と遠ざける過程との間に設けた微小変位過程では、遠ざける過程とほぼ同じ傾きを持って磁氣的吸引力が変化していることがわかる。

ここで重要なことは、約2mmのギャップ長を境としてこれ以上のギャップ範囲とこれ以下の範囲とで、吸引力増減の傾きが逆になっている点である。高温超電導体と磁性体円柱との接近において、前者は不安定であるのに対し、後者は復元力として安定な方向に働く。後者のような現象は、通常の永久磁石と磁性体間のギャップ変化の場合には見られない。従って、この現象は高温超電導永久磁石に特有なものであることがわかる。

ピン止めされた磁束は、磁性体円柱の接近前と後とで全く同一の分布となっているのではなく、一部の磁束は初期のピン止め位置を離れ、磁性体円柱寄りの位置へと移動する。このため、超電導体を近付ける過程と遠ざける過程とでヒステリシスを示していると考えられる。

図4は、種々の先端部直径を持つ磁性体円柱を用いて測定した結果をグラフにしたもので、(a)は微小変位過程の両端(ギャップ長:0.5mm, 0.9mm)での吸引力差から求めた磁気力剛性、(b)は2mm前後のギャップ長付近で現れる、遠ざける過程での吸引力のピーク値、(c)はこの時のギャップ値を表しており、黒丸が実測データ、曲線はこれを近似したものである。横軸は、何れも磁性体円柱先端部の直径とした。

図4(a)から、磁性体円柱先端部の直径が永久磁石の直径に比べて小さい範囲において、磁氣的剛性が最も高くなるような磁性体円柱先端部の最適直径が存在することがわかる。(b)からは、磁性体円柱先端部の直径が大きいと磁氣的吸引力のピーク値も大きくなる傾向があることがわかる。また(c)からは、磁性体円柱の先端直径が小さくなると、吸引力がピークとなる時、即ち吸引力の増減が逆転する時のギャップ長が大きくなる傾向にあることがわかる。

これらの実験では、磁場中冷却時の印加磁界を高くするため永久磁石を2個使用し、超電導体を挟む配置とした。また、永久磁石を取り去る際に超電導体のピン止め磁束が減少するのをできるだけ防ぐため、吸引力測定中も超電導体上側の永久磁石は配置したままとした。これ以外に、磁場中冷却時に使用する永久磁石を下側1個だけとした場合と、磁場中冷却の後に永久磁石を全て取り去って超電導体のみとした場合とでも、やはり図3に示したものと同様な吸引力変化が見られ、また図4に示す結果と似た傾向にあった。

2. 4 磁性体の違いによる特性変化

先の吸引力測定実験では磁性体として炭素鋼を用いたが、この材料はどちらかと言えば半硬質磁性材料に属し、比較的保磁力が高いといわれている⁽⁸⁾。従って、超電導体に接近するとピン止め磁束により着磁され、磁性体が永久磁石化していることも予想される。もし、図4の様なギャップ長に対する吸引力の特異的な変化が磁性体の永久磁石化によって起こっているのならば、超電導体と永久磁石を用いた

図4 磁気力特性; (a)剛性, (b)吸引力のピーク値, (c)吸引力ピーク時のギャップ長
Fig.4. Magnetic force characteristics. (a)Stiffness. (b)Attractive force at the peak. (c)Gap length at the peak.

一般的な高温超電導浮上と相違無いものとなる。

そこで、永久磁石以外のものでもピン止め磁束を絞ることにより吸引力の減少という現象が発生することを確認するため、保磁力が小さな磁性体、すなわち軟磁性体⁽⁹⁾を用いた吸引力の測定実験を行った。表1に、実験で用いた磁性体材料の名称とそれらの磁気特性の概要を示す。これらと比較するため、炭素鋼も測定対象に加えた。各磁性体円

柱の先端部直径をφ8mm, φ6mm, φ4mmに加工して測定対象とし、図2の装置を用いた実験を行った。なお、入手できた2種のパーマロイがφ10の棒材であったため、各測定対象は全長を35mm, 先端部以外の径をφ9mmに統一し、別途真鍮製のおもりを取り付ける構造とした。また、超電導体の磁場中冷却は先の実験で用いた永久磁石を1個、超電導体の下側に配置して行い、冷却後これを取り去った。

表1 実験に使用した材料とその磁気特性の概要
Table 1. List of materials and respective magnetic characteristics.

Material	μ_i	B_s [T]	H_c [A/m]
Carbon Steel	$\approx 1,000$	≈ 1.4	Several Thousand
3%Si Steel	$\approx 1,000$	≈ 1.4	40~80
45Permalloy	2,500~	≈ 1.5	≈ 1.6
78Permalloy	25,000~	0.6~0.8	≈ 23

磁性体円柱に磁場中冷却後の超電導体を近付け、次いで遠ざける過程で吸引力を測定した結果、何れの磁性体においても図3と同様な吸引力変化を示した。このことから、永久磁石特性を持たない磁性体でも、吸引力の減少という現象が発生することを確認できた。

図5(a)にその実験結果から計算した磁気力剛性, (b)に遠ざかる過程での吸引力のピーク値, (c)にその時のギャップ値を示す。

各図は図4とほぼ同様な傾向を示しているが、各磁性体材料の特性について若干の違いが見られる。図5(a)及び(c)を見ると、磁気的剛性と吸引力ピーク時のギャップ値とが最も大きくなる先端部直径は、各材料で異なっていることがうかがえる。また(b)からも、磁性体先端部の直径に対する吸引力ピーク値の変化に多少の違いが見られる。これらのデータから直ちに各材料での磁気力特性の違いを明確にすることはできないが、軟磁性体を用いた場合でも、保磁力が大きな炭素鋼と同程度の磁気的剛性、吸引力及び吸引力が最大となるギャップ値を得ることが可能であることがわかる。

3. 磁性体の浮上

これまでの結果から、あるギャップ範囲において超電導体に磁性体が近付くと双方間の磁気的吸引力が減少し、逆に遠ざかると吸引力が増加するように、磁気的な復元力が発生することを確認できた。そこで、この現象を利用し、実際に磁性体を浮上させる実験を行った。実験装置は、先の図2に示したものと同一のものを使用した。また、浮上させる磁性体は炭素鋼(S45C)を用いて製作し、図4(a)

に示した実験結果を元に、支持剛性が最も高くなるよう先端部の直径を $\phi 8\text{mm}$ とした。

図5 種々の磁性体における磁気力特性

Fig.5. Magnetic force characteristics of various materials, (a)~(c):similar to Fig.4.

図3に示したように、高温超電導体と磁性体との間に働く力は吸引方向の力のみであり、そのままでは磁性体が超電導体にくっついてしまう。従って、安定浮上のためには、一般の能動型磁気浮上機構で行われている様に吸引力と逆向きで一定の力をバイアスとして浮上体に加え、全体として力のバランスをとる必要がある。今回は、磁性体にかかる重力をバランス力として用い、高温超電導体の下に磁性

体をぶら下げる構成とした。図4(b)の結果から、磁性体の先端部直径が $\phi 8\text{mm}$ のときの吸引力のピーク値は約200gfであり、これ以下の荷重範囲において支持剛性が発生する。この実験では、1mm程度のギャップ長で安定に支持されるよう、磁性体の重さを180gとした。

実験では、最初に説明した吸引力測定実験と同様、上下に永久磁石を2個配置した状態で、高温超電導体を液体窒素で超電導転移温度以下に冷却した。次に、上側の永久磁石を残して下側のみを取り外し、磁性体円柱を超電導体の下面に配置した。この直後の様子を表す写真を図6に示す。同図(a)に示すように、高温超電導体を収めた保冷容器(図中、"窒素低温容器"と書いてある部分)の下に、先端を細く削った磁性体円柱がぶら下がっているのがわかる。

この磁性体円柱を手で回転させると、長時間停止すること無く回り続けた。円柱側面の斜めのストライプは、この回転がよくわかるように付けたものである。図6(b)は磁性

(a)

(b)

図6 磁性体が浮上している様子
(浮上ギャップが確認できる)

Fig.6. Stable, contact-less suspension of a 180gf steel weight under a pinned superconductor.

体円柱の先端部を拡大したもので、保冷容器下面(図中上側のぼやけている部分)と磁性体円柱先端間にギャップの存在を確認することができ、磁性体が非接触で浮上していることは明らかである。

磁性体円柱には、回転させるだけでなく縦方向及び横方向の外乱を与えてみたが、いずれの場合も円柱は外乱方向に若干振動しつつも安定にぶら下がり続けた。このように、高温超電導体の下で磁性体が非接触かつ安定にぶら下がることを実証することができた。

4. まとめ

磁場中冷却した高温超電導体と磁束を絞る形状をした磁性体との間の距離を変えて吸引力の変化を測定した結果、超電導体の近傍で磁性体が接近すると吸引力が減少し、遠ざかると逆に吸引力が増加することを発見した。また、この現象を利用した磁性体の非接触安定浮上が可能であることを実証した。

例えばこれまでの高温超電導磁気軸受では回転子に永久磁石が必要であり、この永久磁石が脆いため回転子の機械的強度が不足し回転数があまり上げられなかった。また、リニア搬送に用いる場合は永久磁石が超電導体を軌道として敷き詰める必要があったが、これらを堅牢で安価な鉄などの磁性体金属で構成することが可能となる。

しかし、これまでに磁性体を用いて得られた浮上力は永久磁石を浮上させる場合の1/5～1/10と弱く、剛性も遙かに小さい。この浮上力や浮上剛性の向上が今後の課題である。また、高温超電導体の寸法、同磁束分布、磁性体の形状、同材質などの検討も含めた、本現象の定量的評価を進めていく予定である。

(平成6年6月23日受付)

文献

- (1) Masato .Murakami: "Melt Processed High-Temperature Superconductors.", World Scientific publ.(1992).

- (2) 藤原茂喜, 樋口俊郎: "6軸制御形磁気浮上インテリジェントハンドの小型化" 第9回日本ロボット学会学術講演会論文集, pp403～404(1991).
- (3) 樋口俊郎, 筒井幸雄: "高温超電導体を持つ力学的特性の測定(測定法の提案)", 第49回春期低温工学・超電導学会講演概要集, pp131(1993).
- (4) 樋口俊郎, 筒井幸雄: "高温超電導体を持つ力学的特性の測定(測定法の提案)", 第5回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, pp19～22(1993).
- (5) T.Higuchi, A.J.Kelley, Y.Tsutsui: "Measurement and characterization of force dynamics in High Tc Superconductors", 2nd International Symposium on Magnetic Suspension Technology, pp4-29～4-44(1993).
- (6) 電気学会磁気浮上応用技術調査専門委員会編: "磁気浮上と磁気軸受", コロナ社.
- (7) 後藤聡志, 村上雅人, 腰塚直己, 田中昭二: "溶融法で作製したYBaCuOの磁化特性", 日本応用磁気学会誌 14, pp501～504(1990).
- (8) 日本規格協会: J I S 使い方シリーズ"磁性材料選択のポイント".
- (9) 電気学会編: 電気工学ハンドブック, オーム社.

筒井 幸雄 (正員) 1965年9月2日生。1990年3月佐賀

大学大学院理工学研究科電気工学専攻修了, 同年(株)安川電機入社, 同基礎研究所に勤務。1992年4月(財)神奈川科学技術アカデミーに派遣, 現在に至る。主に高温超電導体を用いた磁気浮上の研究に従事。低温工学会員。

樋口 俊郎 (正員) 1950年2月26日生。1977年東京大

学大学院博士課程修了。同年, 同大学生産技術研究所講師, 1978年同助教授, 1991年11月同大学工学部精密機械工学科教授, 92年4月より, (財)神奈川科学技術アカデミー樋口「極限メカトロニクス」プロジェクトリーダーを兼任, 現在に至る。メカトロニクスに関する研究に従事。IEEE会員。