

バルク高温超電導体の捕捉磁束を用いた 強磁性体の磁気浮上実験

樋口 涼馬^{*1}, 石郷岡 猛^{*2}, 二ノ宮 晃^{*3}

Magnetic Levitation Experiment of Ferromagnetic Block using Trapped Field in Bulk High Temperature Superconductors

Ryoma HIGUCHI^{*1}, Takeshi ISHIGOHA^{*2}, Akira NINOMIYA^{*3},

ABSTRACT : By trapped field in bulk high temperature superconductor (HTS), restoring force acts between iron and bulk superconductor so as to keep the position between them constant. If we could utilize this force, it would be possible to realize a low cost magnetic levitation transport system without using high cost rare earth permanent magnets. In order to confirm this idea, the authors carried out an experiment to levitate an iron block in the space between two bulk superconductors as the first step. The experimental result confirmed this levitation principle. In this paper, an experimental result of levitation experiment is presented.

Keywords : magnetic levitation, high temperature superconductor, iron block, pinning effect

(Received March 2, 2009)

1. はじめに

高温超電導(High Temperature Superconductor: HTS)バルク体を用いた応用のひとつに浮上応用がある。これは、超電導体と永久磁石の組み合わせにより安定な浮上を実現させるというものであり、非接触かつ能動制御なしに安定浮上させられることから、電力貯蔵フライホイールの軸受けや、輸送装置等への応用が検討されている。しかし、超電導体と永久磁石を用いた浮上システムを輸送装置等に応用する場合、軌道部に希土類系の永久磁石を用いると高価なシステムになってしまい、実用化は困難である。

これに対し、東京大学や上智大学のグループにより磁気勾配浮上[1]-[3]や Mixed- μ [4],[5] 等の浮上システムが既に提案されているが、これらの研究を参考にして著者等は、高温超電導バルク体と強磁性体(鉄)との間に働く復元力を利用した浮上システムの研究を進めてきた[6]-[9]。これまでのところ、バルク体と鉄を用いた浮上システムにおいて、2つの着磁したバルク体の間にバルク体サイズより比較的小さい鉄ブロックを空中浮上させることに成功してい

る(図1)。このシステムで十分な浮上力と安定性が得られれば、永久磁石を安価な鉄に置き換えることができ、より低コストの磁気浮上システムを構成することが出来る。

本稿ではバルク体と強磁性体との間に働く復元力の原理を実験的に調べるため、浮上体に直径 10-20mm、高さ 10-20mm の軟鉄製の鉄円柱を使用し、鉄円柱の浮上実験とバルク体間に浮上している鉄円柱に働く電磁力および鉄円柱周辺の磁束密度の測定実験を行ったのでその実験結果について報告する。

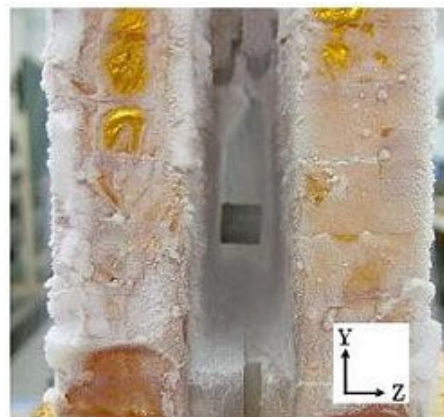


図1 2つのバルク体間に浮上する $\phi 10 \times H10$ mm 鉄円柱

^{*1} : 工学研究科電気電子工学専攻修士学生

^{*2} : エレクトロメカニクス学科教授(ishigoka@st.seikei.ac.jp)

^{*3} : エレクトロメカニクス学科助教

2. 原 理

2. 1 強磁性体に働く磁気力

図2は鉄ブロックにZ軸負の向きに磁気力が加わっているときの磁束線概念図である。磁束線は強磁性体表面に対して垂直になるように侵入し、磁束が侵入した強磁性体表面には磁束線と平行な方向に引っ張り応力が働く。図2では鉄ブロックの左面に侵入する磁束の総量の方が右面よりも多いので、鉄ブロック全体としては左向き(Z軸負の向き)の力を受けることになる。

2. 2 ピンニング効果と超電導バルク体の永久磁石化

高温超電導バルク体内部にはピンニングセンターと呼ばれる微細な常電導相が分散しており、外部磁界を加えている状態で超電導体を冷却し(フィールドクール)超電導状態とするとピンニングセンター周囲を流れる超電導電流により、外部磁界を取り除いても内部に入り込んだ磁束をとどめることが出来る(着磁)。これをピン止め効果と呼び、この効果により超電導体を永久磁石化することが出来る。永久磁石化された超電導体内部の磁束はピン止めにより強く固定されており、一般の永久磁石(フェライト磁石やネオジウム磁石等)は内部の磁束が固定されていないという違いがある。

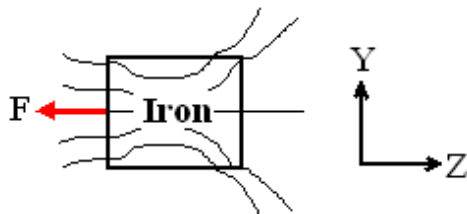


図2 強磁性体に働く磁気力

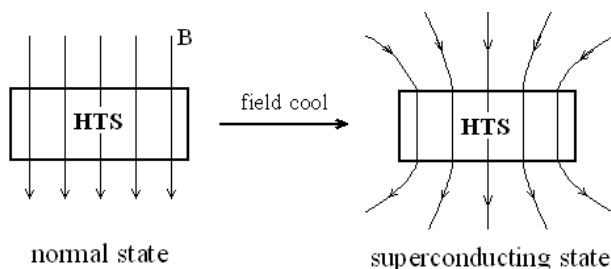


図3 超電導体の永久磁石化

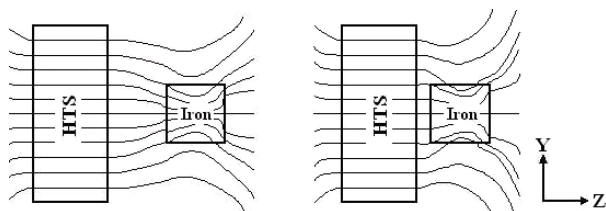


図4 復元力の発現原理

2. 3 HTS バルク体と強磁性体との間に働く復元力

HTS バルク体と強磁性体の間に働く復元力の発現原理については[2],[3]の文献などで述べられているので、これらの文献をもとに説明する。

図4に示すように、着磁した超電導体は内部の磁束がピン止めにより強く固定されているので、強磁性体を遠くからバルク体に近づけていくと、ある位置から強磁性体のYZ面に侵入する磁束が減少し、それにともなって強磁性体とバルク体との間に働く力(吸引力)も減少する。このままではバルク体と強磁性体との間には吸引力しか働かないが、図1に示すように、着磁量がほぼ等しい2つのバルク体を一定の間隔で対向させることにより、強磁性体をバルク体間の中央付近に保持しようとする復元力が働き強磁性体を空中に浮上させることができる。

また、図4の上下方向(Y方向)については、磁束源内部の磁束が固定されていなくても中央付近に戻そうとする力が働くので、通常の永久磁石でも安定する。このため、本稿ではZ軸方向の安定性について述べる。

3. 実験方法

3. 1 HTS バルク体の着磁方法

図5に実験で使用したHTS バルク体を、図6に着磁方法の概念図を示す。実験に使用したバルク体は新日鐵製のGd-QMG bulkで寸法は直径66mm、高さ20mm($\phi 66 \times H20$)である。座標はデカルト座標系を使用し、バルク体のC軸を図5のZ軸と一致させ、ab面をXY面とした。バルク体の着磁には図6に示すC形のコアを持つワイズ型電磁石(WEM)を使用した。

着磁方法を以下に示す。

1) 2つのバルク体を冷却容器間のクリアランスが20mmになるように対向させて電磁石の磁極間にセット。

2) 電磁石に5Aの電流を流し磁極間に一定の磁界を加えた状態に保ち、液体窒素により冷却(フィールドクール)する。

3) 着磁後バルク体を冷却容器ごと磁極間から取り出しそれぞれの実験を行う。

なお、この電磁石の磁極は直径80mmの円柱状であり、磁極間のギャップが68.5mmのとき、磁極間中央付近で約35[mT/A]のZ軸方向磁界が加わるようになっている。

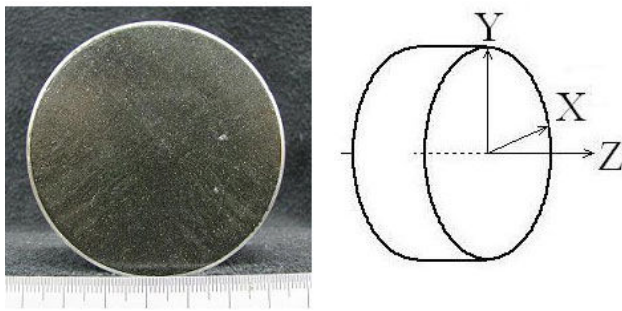


図5 実験に使用したバルク体と座標の定義

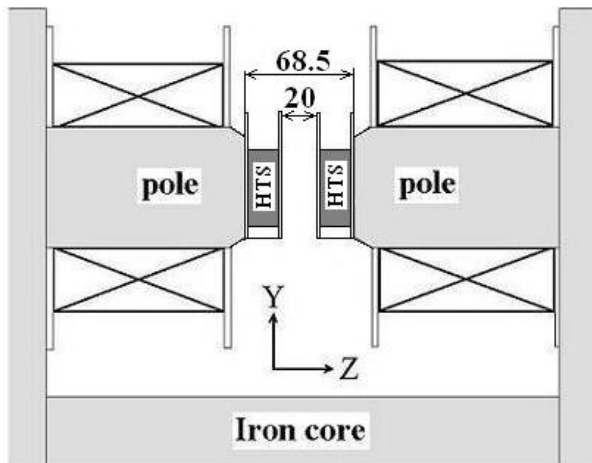


図6 HTS バルク体の着磁方法の概念図

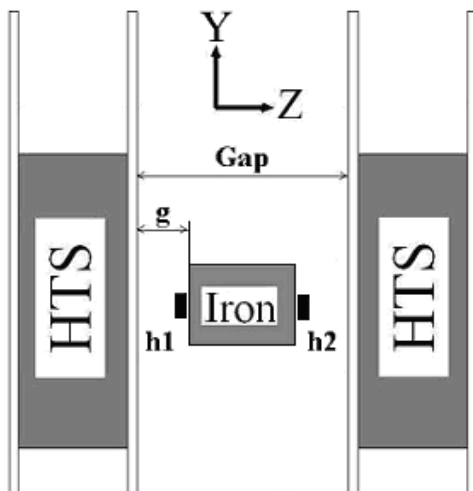


図7 電磁力および磁束密度の測定概念図

3. 2 電磁力および磁束密度の測定方法

図7に電磁力および磁束密度測定概念図を示す。図7中のGapはバルク体冷却容器間の距離で、 g は鉄円柱がバルク体間の中央に浮上しているときの鉄円柱表面と冷却容器間の距離である。鉄円柱をバルク体間の中央からZ軸方向に変位させたときの鉄円柱に働く電磁力をロードセルで測定した。また、鉄円柱左右面に垂直に入ってくる磁束をホールセンサ(h1およびh2)で測定した。鉄円柱およびホールセンサの位置制御には三軸移動ステー

ジを使用した。電磁力は鉄円柱を木製のスティックに埋め込み、この木製スティックをロードセルに固定して測定した(図8)。磁束密度の測定には東芝製のホールセンサTHS119を2つ使用し、鉄円柱左右面に垂直に入ってくる磁束(軸方向磁界)を測定した(図9)。ホールセンサは鉄円柱XY面に近接させて(距離0.5mm程度)左右面に配置し、径方向(X方向)に沿って移動させ軸方向磁界を測定することによりXY面に入ってくる磁束を調べた。

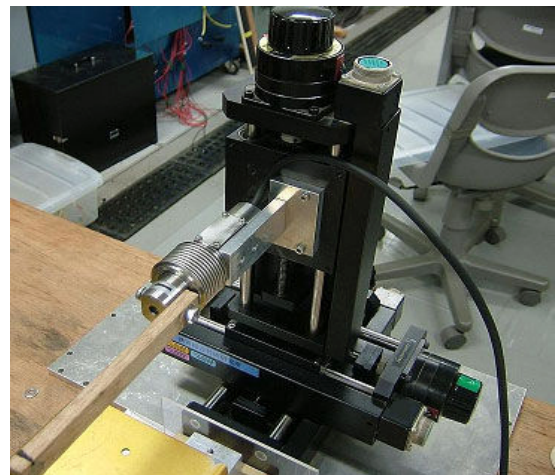


図8 鉄円柱に働く電磁力の測定装置鳥瞰図

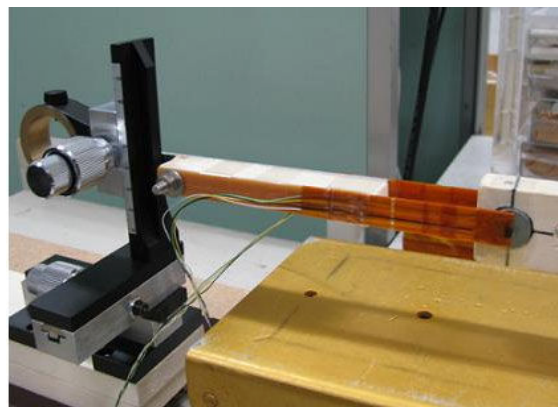


図9 磁束密度の測定鳥瞰図

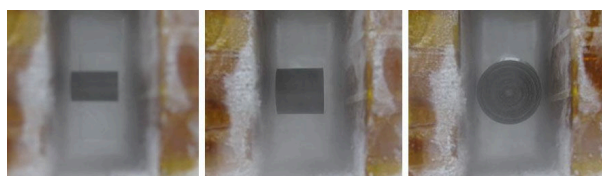
4. 実験結果

4. 1 鉄円柱の浮上実験

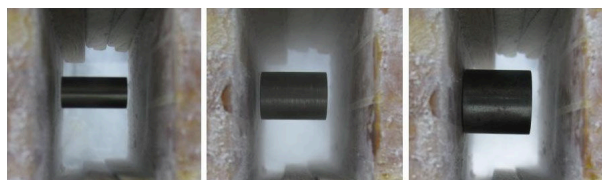
図10に鉄円柱の高さを一定にしてGapと鉄円柱の径を変えてバルク体間に浮上させたとき(g は5mmに固定)の実験結果を示す(左から順に $\phi 10, 15, 20$ mmの鉄円柱)。

図10(a)より、 $\phi 10, 15 \times H15$ mmの鉄円柱では鉄円柱軸方向とバルク体の軸方向が平行の状態に浮上しているが、 $\phi 20 \times H15$ mm鉄円柱では鉄円柱軸方向とバルク体の軸方向が垂直の状態に浮上していることが分かる。 $\phi 20 \times H15$ mm鉄円柱では、直径が高さより大きくなってお

りこのように浮上した方がバルク体間の磁気抵抗が小さくなる。このことから、バルク体間で浮上する鉄はバルク体間の磁気抵抗が最小になるような姿勢をとるといえる。図 10(b)より、鉄円柱高さが 20mm の場合は、鉄円柱径が大きくなるにつれて鉄円柱が左側に寄っていき $\phi 20\text{mm}$ のとき冷却容器に接触していることが分かる。このことから、鉄ブロックサイズが大きくなるとバルク体軸方向の安定性が悪くなるということが言える。



(a) Gap:25mm, iron cylinder size: $\phi 10, 15, 20 \times H15\text{mm}$



(b) Gap:30mm, iron cylinder size: $\phi 10, 15, 20 \times H20\text{mm}$

図 10 鉄円柱の高さによる浮上状態の変化

4. 2 電磁力の測定結果

図 11 に $\phi 10 \times H10\text{mm}$ の鉄円柱に働く電磁力を電磁石の磁極間あるいは着磁したバルク体間で測定した結果を示す。横軸は鉄円柱の Z 軸方向の変位位置であり、変位 0 は鉄円柱がバルク体間の中央に位置していることを示している。縦軸は鉄円柱に働く電磁力であり、Z 軸の正の向きを、電磁力の正と定めている。また、パラメータ中の WEM とは通常の電磁石の磁極間で測定した電磁力を示している。図 11 で鉄円柱を空中に浮上させるような電磁力(復元力)が働くのは、バルク体間(Gap)を 20mm にしたときである。この電磁力はバルク体表面に近づくにつれて力の傾きが増加していく。バルク体間を 25mm にすると鉄円柱の変位方向と同方向に電磁力が加わっているため、空中には浮上せずどちらかのバルク体冷却容器にくっついてしまう。ただし、電磁石の場合は変位方向の電磁力が単調に増加していくのに対して、バルク体間で実験を行った場合には鉄円柱がバルク体に近づくに従って、変位方向の電磁力が減少していくという違いがある。これは、バルク体間のギャップを広げた場合でも 2.3 で示したバルク体表面に近づいた方の鉄円柱表面に浸入する磁束が少なくなっていく現象が現れていることを示している。しかし、Gap:20mm の時と違い、鉄円柱表面から遠い方のバルク体からの影響が小さくなるの

で、Gap:25mm での電磁力は復元力特性を示さなくなる。

図 12 は、高さが同じで直径の異なる鉄円柱をバルク体間に浮上させたときの電磁力の測定結果である。鉄円柱サイズは $\phi 10, 15 \times H20\text{mm}$ で Gap は 30, 34mm で実験を行った。図 12 より、働く電磁力は $\phi 15\text{mm}$ の鉄円柱の方が若干大きい、電磁力の平衡点(電磁力が 0 になるポイント)は $\phi 10\text{mm}$ の鉄円柱の方がバルク体間の中央よりになっているということが分かる。また、Gap が 30mm のときは鉄円柱を電磁力の平衡点に留めようとする復元力特性が表れているが、Gap を 34mm にするとこの特性がなくなる。これらの実験結果から、鉄円柱サイズを大きくすることによって軸方向復元力が大きくなったり、安定性が向上するという効果はあまりないということが電磁力の測定結果からも分かる。

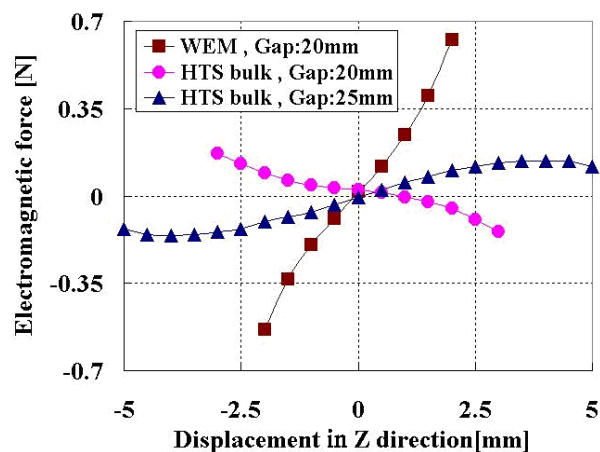


図 11 $\phi 10 \times H10\text{mm}$ の鉄円柱に働く電磁力の比較

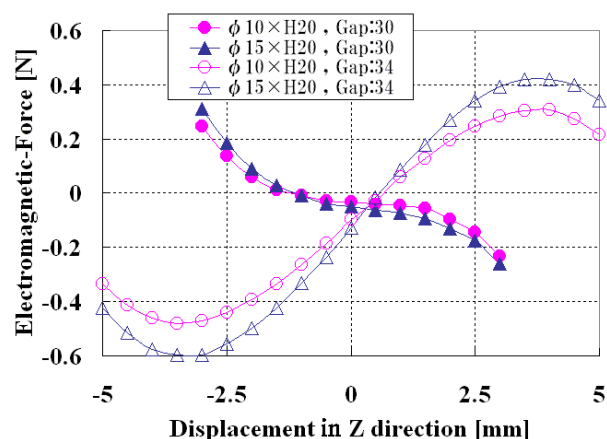
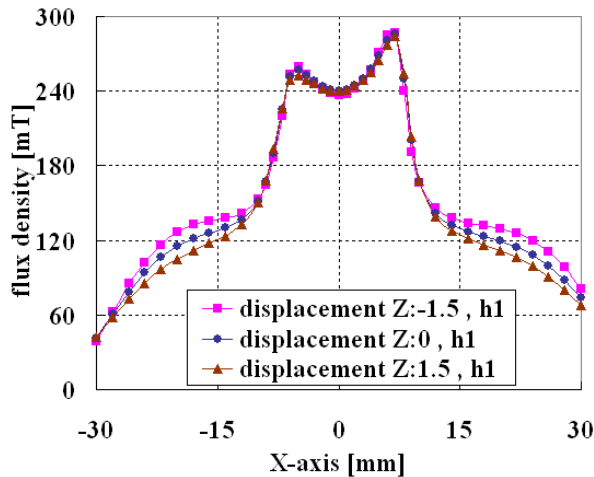


図 12 鉄円柱の直径による電磁力の比較

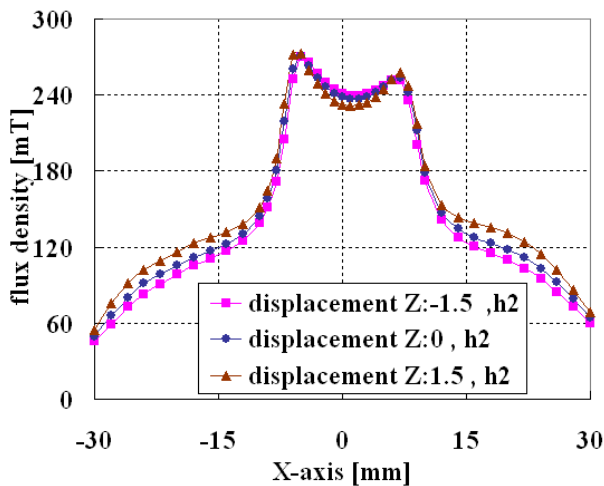
4. 3 磁束密度の測定結果

磁束密度の測定には $\phi 15 \times H20\text{mm}$ の鉄円柱を使用した。バルク体間の Gap を 30mm にして復元力特性をもたせ、鉄円柱左右面に入ってくる磁束を 2 つのホールセンサ h1(図 7 左面に配置), h2(図 7 右面に配置)で測定した。図 13 は磁束密度分布を示すもので、横軸はホールセンサ

位置、縦軸は各位置での軸方向の磁束密度、パラメータは鉄円柱のバルク体間中央からの変位量である。図 13(a)では、鉄円柱が $Z=-1.5\text{mm}$ の位置にあるとき鉄円柱のエッジ($X=\pm 7.5\text{mm}$ の位置)より内側の鉄円柱中央付近での磁束密度が一番低くなり、エッジより外側の部分では磁束密度が一番高くなっているのに対して、図 13(b)ではその逆になっている。この、鉄円柱中央付近で起こるこの磁束密度の減少が高温超電導バルク体と強磁性体との間に働く復元力になっていると考えられる。



(a) left side



(b) right side

図 13 $\phi 15 \times H20\text{mm}$ 鉄円柱左右表面の磁束密度分布

図 14 には電磁石の磁極間に $\phi 10 \times H10\text{mm}$ の鉄円柱を配置し、鉄円柱の軸方向変位に対する鉄円柱右面の磁束密度を径方向に沿って測定した結果を示す。このとき電磁石の磁極間の Gap は 23mm で励磁電流は 5A である。図 14 より、超電導バルク体を使用したときの実験結果と異なり、鉄円柱が近づいたことによる磁束の減少は見られなかった。これから、一様な磁界中でも通常の永久磁石や電磁石では軸方向の復元力は得られないことが分かる。

図 15 に横軸を鉄円柱のバルク体間中央からの軸方向の変位量、縦軸を軸方向の磁束密度、パラメータをホールセンサ位置として表したグラフを示す。 $X=-3, 0$ の位置ではバルク体に近づいた方の磁束密度は下がり、遠ざかった方の磁束密度は上がっていくのに対し、 $X=-7$ (エッジ付近) ではその逆の傾向になっている。また、 $X=0$ と $X=-3$ の特性を比較すると $X=0$ の方が軸方向変位に対する磁束密度の傾きが大きくなっている。これから、復元力の発現は鉄円柱中央付近で顕著であることが分かる。

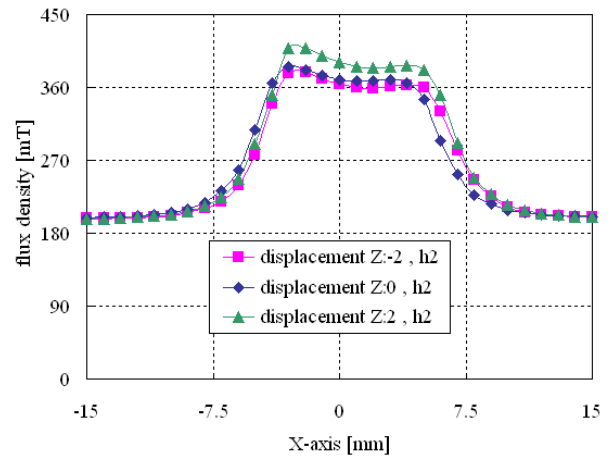


図 14 電磁石の磁極間で測定した磁束密度分布

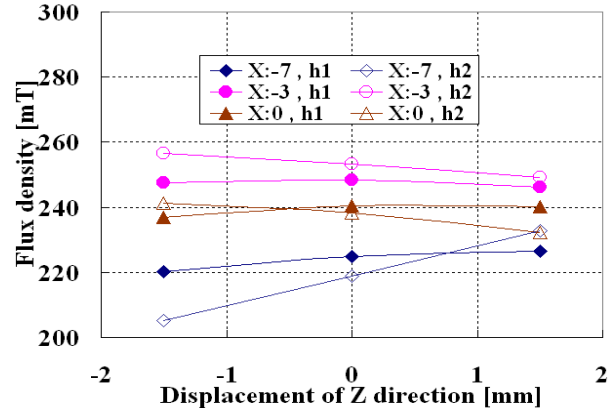


図 15 Gap: 30mm のときの鉄円柱左右面の磁界変化

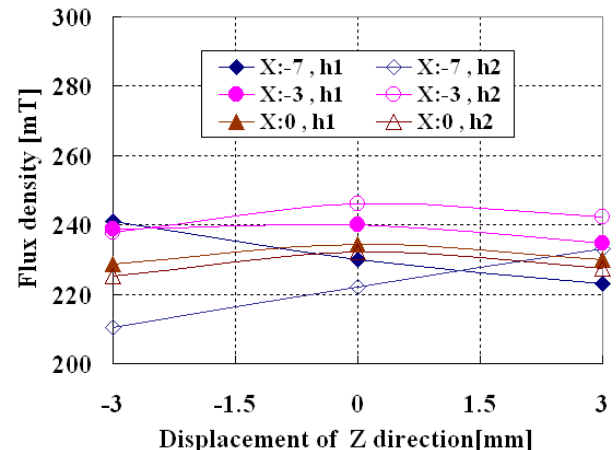


図 16 Gap: 34mm のときの鉄円柱左右面の磁界の変化

図 16 は Gap を 30mm から 34mm まで広げて行ったときの結果である。復元力の元となる鉄円柱の接近による磁束密度の減少はみられるが、Gap の広がりに伴い鉄円柱から遠い方のバルク体からの影響が小さくなり、バルク体から離れている方の磁束密度も減少している。この結果から、バルク体間の数 mm の違いが鉄ブロックの浮上に大きく影響するということがいえる。

5. 結 論

本研究では着磁した 2 つのバルク体間に鉄円柱を浮上させ、バルク体と鉄の間に働く復元力を電磁力と磁束密度の両面から実験的に検討した。磁束密度の測定結果から、バルク体に鉄円柱が近づくにつれてバルク体に対向する鉄円柱の表面 (XY 面) に垂直に侵入する磁束が低減する現象がある事が確かめられた。この現象は通常の永久磁石と鉄円柱の間には現れない現象であり、復元力の発現の基礎となる現象を裏付けるものである。また、この現象は鉄円柱の中央に近い部分で顕著になっているということが分かった。なお、これらの現象については今後理論的検討を加えていきたい。

謝 辞

本研究遂行に当たり、多大なご援助を頂いた(財)鉄道技術総合研究所の上條弘貴博士に深謝申し上げる。

参考文献

- [1] H. Ohsaki, M. Takabatake, and E. Masada, “Stable Magnetic Levitation of Soft Ferromagnetic Materials by Flux Pinning of Bulk Superconductors” IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 33, No. 5, September 1997
- [2] 大崎 博之, 高畠 幹生, 正田 英介 「バルク超電導体の J_c -B 特性を考慮した磁気勾配浮上の特性解析」 超電導応用電力機器合同研究会 ASC-97-8 LD-97-16, pp. 33-38
- [3] 筒井 幸雄, 樋口 俊郎 「高温超電導体と軟磁性体を組み合わせた磁気浮上機構の改良」 低温工学, Vol. 31, pp. 61-65, 1996
- [4] Y. Fukasawa, and H. Ohsaki, “Three-Dimensional Structure of Magnetic Field in the Mixed- μ Levitation System using Bulk Superconductors” IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 9, No.2, June 1999
- [5] T. Takao, A. Niino, S. Suzuki, M. Hashimoto, H. Kamijo, and H. Fujimoto “Experimental and Numerical Analysis of Lift Force in Magnetic Levitation System” IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 15, No.2, June 2005
- [6] 樋口 涼馬, 二ノ宮 晃, 石郷岡 猛 「高温超電導バルク体と鉄レール間のピンニング力を用いた磁気浮上装置の試作」 第77回2007年度秋期低温工学・超電導学会講演概要集, No. 2P-p29, p. 174
- [7] 樋口 涼馬, 二ノ宮 晃, 石郷岡 猛 「高温超電導バルク体の捕捉磁界を利用した鉄ブロックの浮上実験」 第79回2008年度秋期低温工学・超電導学会, No. 1P-p3
- [8] Ryoma Higuchi, Akira Ninomiya, and Takeshi Ishigohka, “Levitation Experiment of Iron Block using Pinning Flux in HTS Bulk Material.” IEEE Transactions on Applied Superconductivity. Aug, 2008 in Chicago
- [9] 樋口 涼馬, 二ノ宮 晃, 石郷岡 猛 「高温超電導体の捕捉磁界を利用した鉄ブロックの浮上実験」 電気学会超電導応用電力機器研究会, ASC-09-19, 2009年2月