

直流磁界中における高温超電導バルクの二次元力基礎実験

吉田, 欣二郎

九州大学大学院システム情報科学研究科電気電子システム工学専攻

松田, 茂雄

九州大学大学院システム情報科学研究科電気電子システム工学専攻 : 修士課程

松本, 洋和

九州大学大学院システム情報科学研究科電気電子システム工学専攻 : 修士課程

<https://doi.org/10.15017/1515674>

出版情報 : 九州大学大学院システム情報科学紀要. 5 (1), pp.119-123, 2000-03-24. 九州大学大学院システム情報科学研究所

バージョン :

権利関係 :

直流磁界中における高温超電導バルクの二次元力基礎実験

吉田欣二郎*・松田茂雄**・松本洋和**

A Basic Experiment on Two-Dimensional Force of HTSC-Bulk in DC Magnetic-Field

Kinjiro YOSHIDA, Shigeo MATSUDA and Hirokazu MATSUMOTO

(Received December 10, 1999)

Abstract: High temperature superconducting (HTSC) bulk can levitate stably on a track which consists of permanent magnets of the same polarity. This is because HTSC-bulk has a pinning force which keeps from vertical displacement due to the weight. We have proposed a new LSM theory which is based on an idea of considering the pinning force as synchronizing force in using armature travelling-magnetic-field instead of permanent magnets. However, the lift force enough to levitate the vehicle on the ground has not been produced, so that basic experiments to verify the theory have succeeded on the water by the help of simple HTSC-bulk ships. We had to study on a sufficiently large lift-force exerted between pinned HTSC-bulk and travelling-magnetic-field. This paper presents a basic experiment on two-dimensional force produced in HTSC-bulk in DC magnetic-field and that two different modes of repulsion and attraction are caused dependently on relative strength between pinning and external magnetic fields. Especially, two-dimensional force in repulsive mode is found to have stable region limited by peak values of levitation force. The largest levitation force among the peak values obtained in the experiments is 20 newtons which is five times heavier than a weight of the HTSC-bulk magnet.

Keywords: HTSC-bulk, Pinning force, DC magnetic-field, Two-dimensional force, Levitation force

1. ま え が き

高温超電導体(HTSC)を用いた磁気浮上車は、推進方向に沿って同極の永久磁石を敷設した軌道上で磁束ピン止め効果により、安定浮上することが知られている¹⁾。しかし、永久磁石軌道方式は極めてコスト高で実用的ではなく、しかも、全く別の推進装置が必要である。

筆者らの一人は、これまで HTSC バルクを利用した磁気浮上車システムについて、磁束ピン止め力を同期化力として利用する新しい LSM の原理に基づき、エアコア三相電機子巻線軌道²⁾ (ME03) および鉄心電機子巻線軌道³⁾ (ME02) 上で、車両に搭載した HTSC バルクを励磁し、磁束ピン止めを行い、LSM の原理を実現して、安定に案内走行させることに成功してきた。しかし、これまでの走行実験では浮上に必要な力が得られず、水の浮力を利用したが、新たな浮上方式を開発する必要があった。

本論文は、初期励磁を行ってピン止めされた HTSC バルクが直流磁界中で受ける電磁力を実験により測定し、HTSC バルクに働く二次元電磁力の基礎特性について

検討したものである。

2. 基 礎 実 験

2.1 実験の概略

実験において、試料となる HTSC バルク (YBaCuO) は直径48mm、幅24mmの円柱形のものを用い、冷却用容器、および液体窒素を含めた全体(以下、HTSC バルク磁石)の重量は430gである。

実験に用いた電磁石は当研究室が所有する、ギャップの断面が円形のものを用いた。Fig. 1は実験に用いた電磁石の概略図であり、図に示すように座標系を採って実

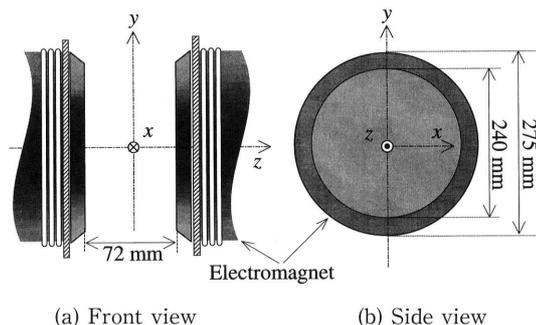


Fig. 1 Schematic diagram of electromagnet and xyz -coordinate system

験を行った。Fig. 2は $B_{ex}=0.2T$ としたときの電磁石の発生する磁束密度の分布を測定したものである。この図より、円形電磁石の原点から $y=90mm$ までの領域では均一な磁界が発生しているが、半径90mm以上で増加し始め、端部磁界は急激に変化していることが判る。特に、磁石内径(120mm)近傍の磁束密度 B_y と B_z (特に強く塗った部分)はパルス的な変化を示す。

$(B_{ex})_i$ は、磁束ピン止めを行うための初期励磁を行う際に印加する直流磁界であり、 B_{ex} は磁束ピン止めされたHTSCバルクに対して印加する磁界を表している。

2.2 直流均一磁界中での磁界方向力 F_z の測定

2.2.1 実験方法

Fig. 3は実験装置の概略図である。まず、HTSCバルクを座標系の原点に、電磁石の磁界方向 z 軸とHTSC

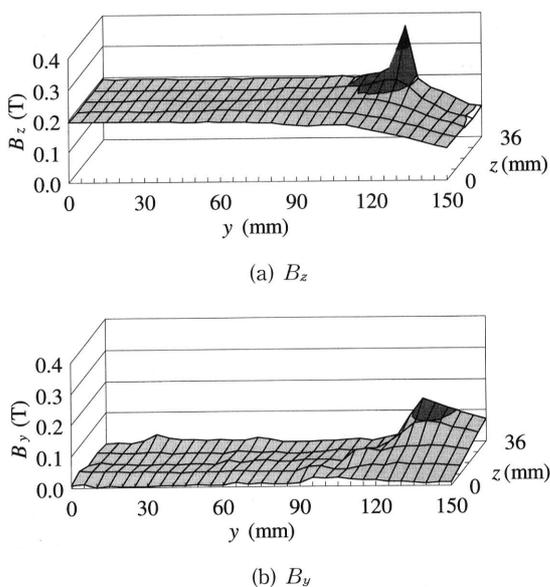


Fig. 2 Flux density distribution within gap of Electromagnet

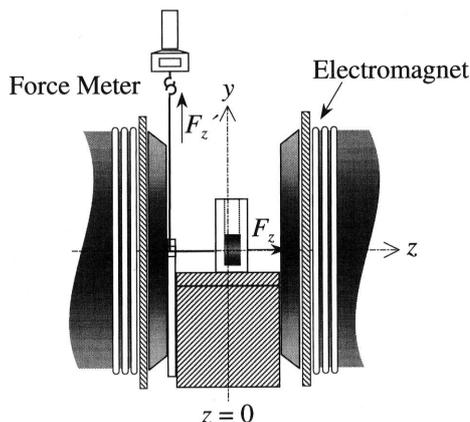


Fig. 3 z -directed magnetic force measurement in DC magnetic-field

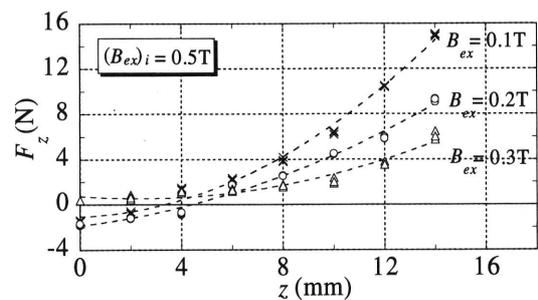
バルクの中心軸とが一致するように補助台で固定する。次に、電磁石によって $(B_{ex})_i=0.5T$ の均一な直流磁界を印加しつつ、液体窒素で冷却しながら磁束のピン止めを行った。

磁束ピン止め後、電磁石による外部印加磁界 B_{ex} を0.1から0.6Tまで0.1T刻みで印加し、HTSCバルク的位置を z 方向に2 mm毎に14mmまで変化させたとき、HTSCバルクに働く z 方向の電磁力 F_z をフォースメータによって測定し、測定値 F_z' は容器と補助台との間の摩擦力 F_μ を含むので、摩擦力 F_μ を測定し、補正を行ってHTSCバルクに実際に働く電磁力 F_z を求めた。

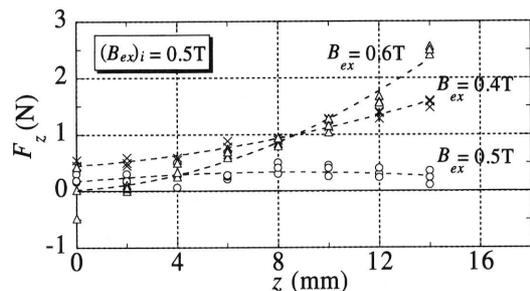
2.2.2 実験結果

Fig. 4にピン止め磁界 $(B_{ex})_i=0.5T$ の場合の電磁力 F_z の z 方向依存性を示す。実験ではそれぞれ3回ずつ測定し、その平均値から得られる特性を最小二乗法によって多項式近似している。 F_z は基本的に正の値であり、変位の方向(ギャップを縮める方向)への力、すなわち吸引力である。しかも、 F_z は z 方向変位と共に放物線的に増大する傾向を示す。これは永久磁石が鉄に対して示す性質に類似している。

Fig. 5はピン止め磁界 $(B_{ex})_i=0.5T$ の場合の F_z と B_{ex} の関係を、HTSCバルク的位置 $z=4, 8, 12mm$ について示したものである。 F_z はピン止め磁界 $(B_{ex})_i$ と外部印加磁界 B_{ex} の差が大きくなるにつれて電磁力も大きくなる。特に Fig. 4(b)から、 $(B_{ex})_i=B_{ex}$ のとき、HTSCバルクにはほとんど電磁力は働かないことが判



(a) Experimental results for $B_{ex}=0.1, 0.2, 0.3T$



(b) Experimental results for $B_{ex}=0.4, 0.5, 0.6T$

Fig. 4 z -dependence of the z -directed magnetic force under the condition $(B_{ex})_i=0.5T$

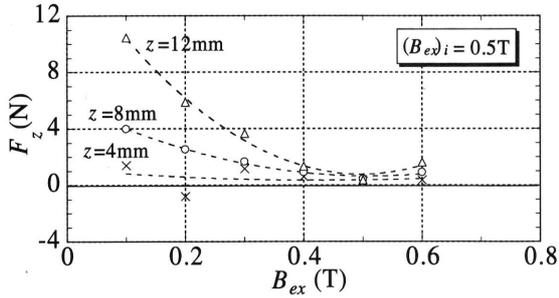


Fig. 5 B_{ex} -dependence of the z -directed magnetic force under the condition $(B_{ex})_i = 0.5T$

る。これは、理論計算結果とも一致する⁴⁾。また、実験の再現性についても確認できた。

2.3 直流磁界中での磁界に垂直な方向力 F_y の測定

2.3.1 実験方法

Fig. 6 は実験装置の概略図である。磁束のピン止めは、前節 2.2.1 と同様な方法で行った。磁束ピン止め後、磁束ピン止め磁界 $(B_{ex})_i$ と同方向の外部印加磁界 B_{ex} に対して HTSC バルクを原点から y 軸に沿って移動させ、HTSC バルクの位置に対する y 方向の電磁力 F_y を測定した。

2.3.2 実験結果

(a) $B_{ex} \leq (B_{ex})_i$ のとき

Fig. 7 はピン止め磁界 $(B_{ex})_i = 0.5T$ 、外部印加磁界 $B_{ex} = 0.1 \sim 0.5T$ における HTSC バルク磁石の位置 y と電磁力 F_y との関係を示したものである。実験は $y \geq 0$ の領域について F_y の測定を行い、Fig. 7 では原点对称の性質により、 $y < 0$ の領域まで拡張している。

図において、 $B_{ex} \leq (B_{ex})_i$ の場合には HTSC バルク磁石に働く電磁力 F_y は電磁石に対する吸引力のみであり F_y の大きさは、 B_{ex} が大きいほど大きくなっていることが判る。 $B_{ex} = 0.5T$ のグラフが途中でできているのは力が実験に用いたフォースメータの測定範囲を超えたためであり、更に大きな F_y が期待できる。また、HTSC バル

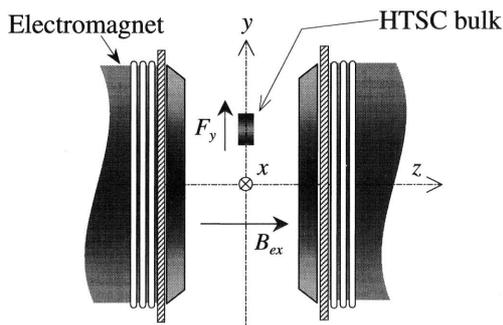


Fig. 6 y -directed magnetic force measurement in DC magnetic-field

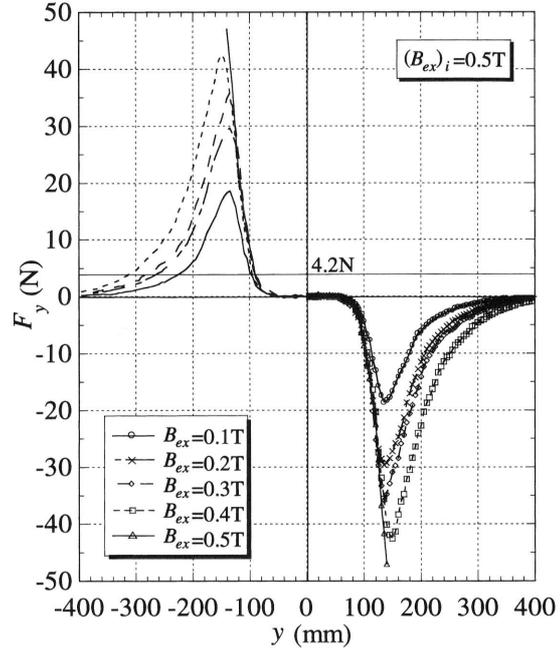


Fig. 7 y -dependence of the y -directed magnetic force under the condition $(B_{ex})_i = 0.5T$

ク磁石の自重 (4.2N) と F_y とが釣り合う点で HTSC バルク磁石は浮上するが、 F_y が最も小さくなる $B_{ex} = 0.1T$ の場合においても、 $y < 0$ で HTSC バルク磁石を浮上させるのに十分な電磁力が得られていることが判る。

Fig. 2 の電磁石の発生する磁束密度分布と Fig. 7 のグラフを比較すると、HTSC バルクに均一な直流磁界が印加される領域ではほとんど F_y は働かないが、HTSC バルクの一部が磁界の不均一な領域に差し掛かると F_y が発生し始めることが判る。

以上のように $B_{ex} \leq (B_{ex})_i$ の条件での F_y を測定し、HTSC バルク磁石を y 方向に関して安定浮上させることができた。

(b) $B_{ex} \leq (B_{ex})_i$ と $B_{ex} > (B_{ex})_i$ との違い

$B_{ex} \leq (B_{ex})_i$ と $B_{ex} > (B_{ex})_i$ との違いを比べるために Fig. 8 に $(B_{ex})_i = 0.2T$ 、 $B_{ex} = 0.10, 0.20, 0.25T$ のときの位置 y と電磁力 F_y との関係を示す。

Fig. 8 において $(B_{ex})_i = 0.2T$ 、 $B_{ex} = 0.25T$ のグラフは $B_{ex} \leq (B_{ex})_i$ の条件下では見られない、電磁石と HTSC バルク磁石との反発力が発生していることが判る。また、 $B_{ex} \leq (B_{ex})_i$ の条件の基では、 B_{ex} が大きくなるほど、吸引力は大きくなる。しかし、 B_{ex} を大きくしていき、 $B_{ex} > (B_{ex})_i$ となる $B_{ex} = 0.25T$ においては $B_{ex} = 0.20T$ のグラフと比べて吸引力が減少していることが判る。

(c) $B_{ex} > (B_{ex})_i$ のとき

Fig. 9 はピン止め磁界 $(B_{ex})_i = 0.2T$ 、 $B_{ex} = 0.3, 0.4, 0.5, 0.6T$ の場合における HTSC バルクの位置 y と電磁力 F_y との関係を示したものである。

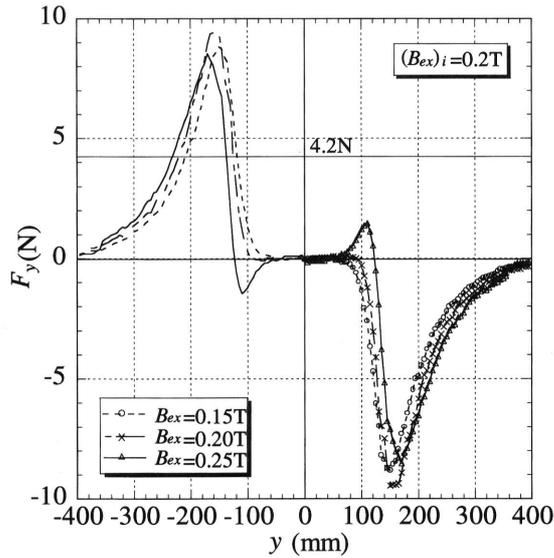


Fig. 8 y -dependence of the y -directed magnetic force under the condition $(B_{ex})_i=0.2\text{T}$, $B_{ex}=0.15, 0.20, 0.25\text{T}$

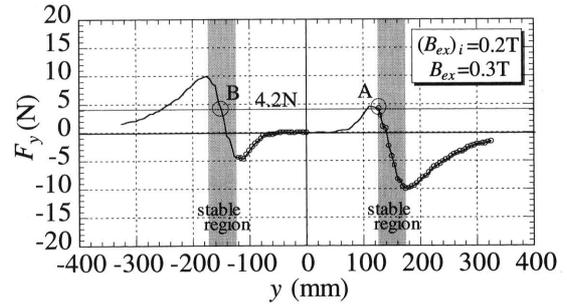
この図において、 $B_{ex} > (B_{ex})_i$ では B_{ex} が大きくなると、HTSCバルクの電磁石に対する吸引力の最大値が小さくなる事が確認できる。しかしながら、それ以上に電磁石に対する反発力の最大値は増大している。

このように、 $B_{ex} > (B_{ex})_i$ の条件下では y の値によって、吸引力と反発力が働いたため、 $B_{ex} \leq (B_{ex})_i$ の場合と異なり、HTSCバルクの浮上位置は二箇所存在する。つまり、 $y > 0$ ではHTSCバルク磁石の自重と電磁石間の反発力とが釣り合う点で浮上し、 $y < 0$ ではHTSCバルク磁石の自重と電磁石間の吸引力とが釣り合う点で浮上する。しかも、HTSCバルク磁石が浮上位置から変位しても、HTSCバルク磁石と電磁石との間にはHTSCバルク磁石を浮上位置に固定しようとする電磁力が働くため、 y 方向に関して、安定に浮上する。このHTSCバルクを浮上位置に固定しようとする電磁力が働く安定浮上領域をFig. 9において網掛けで示している。この安定浮上領域は B_{ex} が大きくなるほどその領域の範囲も広がっていることが判る。

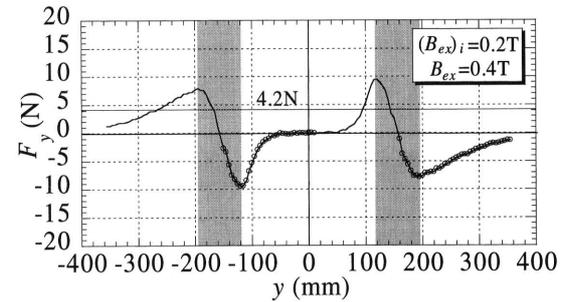
Fig. 10はFig. 9(a)の $(B_{ex})_i=0.2\text{T}$, $B_{ex}=0.3\text{T}$ の場合におけるHTSCバルクの浮上位置A点、及びB点を図示したものである。

2.3.3 浮上位置での F_z の測定

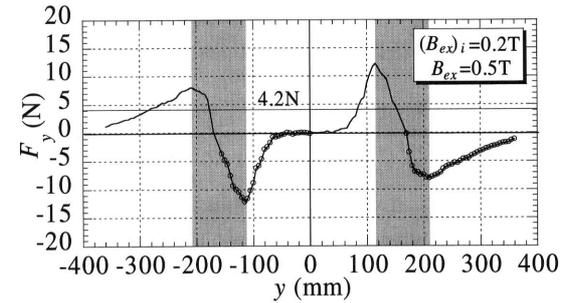
前述のように、 y 方向に関してはHTSCバルク磁石を十分に浮上できる電磁力が得られるが、 $B_{ex} \leq (B_{ex})_i$ と $B_{ex} > (B_{ex})_i$ とではHTSCバルク磁石に働く電磁力の性質が異なることが判った。次に $y=0$ での F_z の測定と同様に $(B_{ex})_i=0.2\text{T}$ の条件下でピン止めを行い、 $B_{ex}=0.1\text{T}$ における浮上位置 ($y=-114\text{mm}$)、 $B_{ex}=0.15\text{T}$ における浮上位置 ($y=-118\text{mm}$)、及び $B_{ex}=0.3\text{T}$ における浮



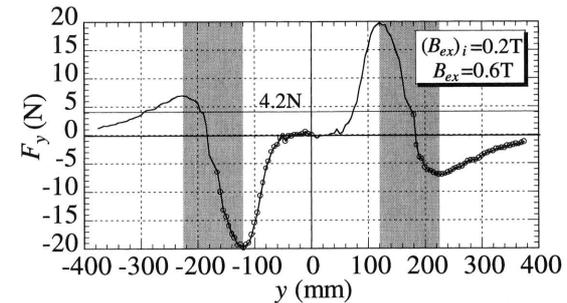
(a) $B_{ex}=0.3\text{T}$



(b) $B_{ex}=0.4\text{T}$



(c) $B_{ex}=0.5\text{T}$



(d) $B_{ex}=0.6\text{T}$

Fig. 9 y -dependence of the y -directed magnetic force under the condition $(B_{ex})_i=0.2\text{T}$

上位置 ($y=127\text{mm}$) での F_z を測定した。Fig. 11はその測定結果である。

この図より、 $B_{ex} \leq (B_{ex})_i$ の条件下では、HTSCバルク磁石には電磁石表面に対する吸引力が働き、 B_{ex} が小さくなるほど、吸引力も大きくなっているのが判る。また、

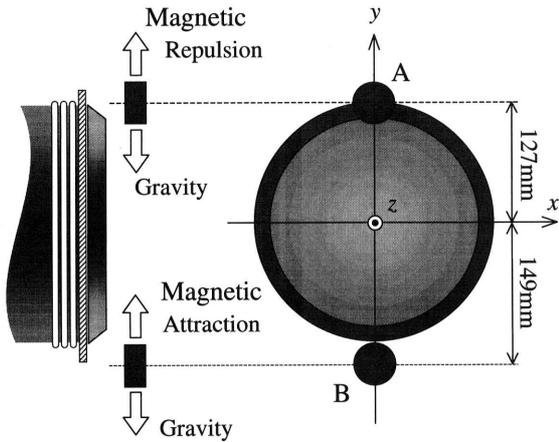


Fig. 10 Bulk's position along the y -axis under the condition $(B_{ex})_i=0.2\text{T}$, $B_{ex}=0.3\text{T}$

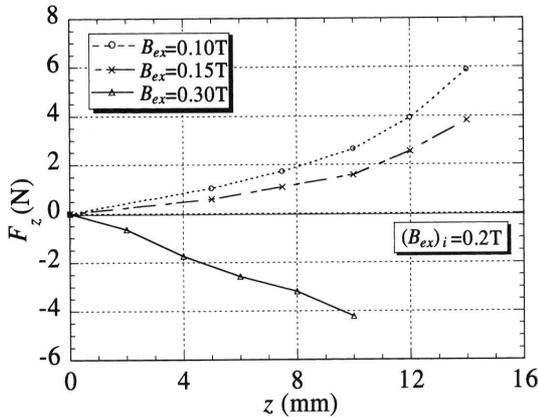


Fig. 11 z -dependence of the z -directed magnetic force under the condition $(B_{ex})_i=0.2\text{T}$

$B_{ex} > (B_{ex})_i$ では、HTSCバルク磁石には電磁石に対する反発力が働き、HTSCバルク磁石の z 方向変位に対して $z=0$ に固定するような復元力が得られ、 z 方向変位が大きくなるほど、復元力も大きくなっていることが判る。図において、 $B_{ex}=0.3\text{T}$ のグラフが $z=10\text{mm}$ までとなっている。これは F_z が反発力であるため、Fig. 3に示したガイド部が $z > 10\text{mm}$ で、HTSCバルク磁石の容器と干渉するためであり、 $z > 10\text{mm}$ では、さらに大きな反発力が期待できる。

Table 1は $B_{ex} \leq (B_{ex})_i$ と $B_{ex} > (B_{ex})_i$ の条件での二

Table 1 Stability characteristics of HTSC bulk in DC magnetic-field

Items	Conditions	$B_{ex} \leq (B_{ex})_i$	$B_{ex} > (B_{ex})_i$
F_y along the y -axis ($z=0$)		Attraction force	Repulsion force ($y > 0$) Attraction force ($y < 0$)
	F_z at levitation point	Attraction force	Repulsion force (Restoring force)
(*) Levitation Region		$-y_{max} < y < -y_{min} < 0$	$0 < y_{min} < y < y_{max}$ $-y_{max} < y < -y_{min} < 0$
Levitation Stability		Unstable [Stable for y -direction] [Unstable for z -direction]	Stable [Stable for y -direction] [Stable for z -direction]

(*) y_{min} and y_{max} are minimum and maximum positions of positive y within stable-state region, respectively.

次元力特性をまとめたものである。

3. む す び

今回の実験により、 $(B_{ex})_i$ と同方向の直流磁界 B_{ex} 中のピン止めされたHTSCバルクに働く電磁力の基本特性を得ることができた。特に、 $B_{ex} \leq (B_{ex})_i$ と $B_{ex} > (B_{ex})_i$ との条件の違いによって、 F_y の特性、および浮上位置での F_z の特性が大きく異なるという大変興味深い結果を明らかにした。 $B_{ex} > (B_{ex})_i$ の場合、特に $(B_{ex})_i = 0.2\text{T}$ 、 $B_{ex} = 0.6\text{T}$ の場合には、HTSCバルク磁石の自重よりも約5倍大きい浮上力 F_y が復元(案内)力 F_z とともに得られることを見出した。

今後はこの性質を利用した磁気浮上システムの開発を進めていきたい。

参 考 文 献

- 1) 村上雅人：「超電導体の電磁力を利用した応用」第5回電磁力関連のダイナミックシンポジウム講演論文集基調講演 pp. 9-14 (1993年6月)
- 2) K. Yoshida, H. Takami, M. Kanehiro: "A Basic Study on HTSC-Bulk Air-Cored LSM" ICEM'98 Vol. 3, pp. 1089-1094 (1998)
- 3) K. Yoshida, H. Takami, M. Kanehiro, S. Arima: "A New HTSC-BULK MOTOR" Advances in Superconductivity IX, Vol. 2, pp. 1369-1372 (1996)
- 4) 吉田・高見・松田：「軸対称三次元磁界中の高温超電導バルクの有限要素法による電磁力解析」平成11年電気学会全国大会 No. 1360