

## 一対の超電導バルク磁石と着磁用電磁石の併用による 小型強磁性体の浮上と制御

二ノ宮 晃\*<sup>1</sup>, 瓜生 芳久\*<sup>2</sup>

Levitation and control of small ferromagnetic materials by the combined use of a pair of HTS superconducting bulk magnets and an electromagnet

Akira NINOMIYA\*<sup>1</sup>, Yoshihisa URIU\*<sup>2</sup>

**ABSTRACT** : We found out that a pair of trapped magnetic field of high temperature superconducting bulk magnets is capable of floating the iron block in its space. And also, the gap space between the two HTS bulk magnets is very important to levitate the iron object. That is to say, if it tries to levitate smaller iron object in a constant gap space, the object will be attracted one side of HTS bulk magnet. Then, we conducted the improvement of this method to be able to levitate smaller iron object in a constant gap space. As a result, it was found that when an electromagnet, which uses the HTS bulk magnet magnetization, utilizes together with the trapped magnetic field of HTS bulk magnets, it is possible to levitate smaller iron object in constant gap space. And also the superimposed magnetic field, which composed of electromagnet and HTS bulk magnet, can create the constant magnetic field in the gap. By using this field, we found that magnetic particles such as iron sand can move in larger gap space.

**Keywords** : HTS bulk magnet, electromagnet, levitation, ferromagnetic material, uniform magnetic field

(Received Sep. 26, 2012)

### 1. はじめに

HTSバルク磁石の応用の一つに磁気浮上がある。その研究の多くは、超電導体と永久磁石の組み合わせである。これは、非接触かつ能動的な制御を必要としないことから電力貯蔵用フライホイール(磁気軸受け)や輸送装置など広く検討されている<sup>1),2),3)</sup>。また、HTSバルク磁石と軟鉄材料を用いた磁気浮上についても検討がなされている<sup>4),5)</sup>。著者らは、これらの手法を基に、新たに一対のHTSバルク磁石を用いて一定のギャップ中(20 ~ 37 mm)に直径10 ~ 20 mmφ程度の軟鉄製の球や円柱が浮上できることを見出し、浮上体に加わる磁気力測定より浮上体にはギャップ中央を向く復元力が働くことを明らかにしてきた。それと同時に、ギャップを広げると磁性体は浮上できないことも明らかになった<sup>6),7)</sup>。これは、HTSバルク磁石の磁場値

やHTSバルク磁石近傍での磁場勾配が浮上体サイズとギャップ間隔に密接な関係を与えている結果である。そこで、本論文では浮上原理を把握するために、バルク磁石近傍の磁気的な性質、特に浮上体がバルク磁石に接近したときの磁気的な振る舞いについて実験的検討を通して明らかにすることを目的に実施した。そして、得られた知見を基にギャップ間隔を変えることなく、より小型の磁性材料(磁性粒子を含む)の浮上可能性について検討した。なお、浮上には上下(重力)方向およびこれに垂直な左右方向の両方について検討する必要があるが、ここでは左右方向についてのみ検討している。

これより、磁性体がギャップ空間で浮上するときは、バルク体の内表面に遮蔽電流が誘起されることを確認した。また、より小型の磁性材料を浮上させるには、空間の磁場特性を変化させて一様化させることが効果的であることを見出した。この磁場の一様化に利用した設備は、バルク磁石の着磁に利用した電磁石である。超電導バルク磁石の磁気作用はまさしく永久電流である。この電流

\*<sup>1</sup> : システムデザイン学科 助教 (ninomiya@st.seikei.ac.jp)

\*<sup>2</sup> : システムデザイン学科 教授

の向きが逆になるように新たに電流を誘導させると磁場は弱まるが、その強さを調整すると浮上特性にどのような変化が現れるか注視して実験を進めた。その手法は、フィールドクール法 (FC法) で着磁したHTS磁石に、電磁石を用いて着磁時と同一方向の磁場を超電導状態のバルク磁石に印加するものである。このとき、バルク磁石に誘起される電流の向きは、FC法で着磁したそれとは逆になる。これについて実施した結果、外部磁場を印加する以前はバルク磁石に引きついていた磁性体(直径 5 mm  $\phi$ 、高さ 5 mmの鉄円柱; 5 mm  $\phi$   $\times$  5 mmHと表記)が、外部磁場を加えていくと浮上し始め、ギャップ中央まで移動できることが可能になった。

この方式を進めれば、より小径の磁性体も浮上できるのではないかと検討を加えたが 3 mm  $\phi$ の鉄球がバルク体近傍で浮上するだけであった。しかしながら、ギャップ磁場を一樣化させる効果を利用すると、移動させたい場所に新たに磁性体を置くだけで磁性粒子を移動させることができることを見出した。本論文は、これら一連の実験結果をまとめたものである。

2. 実験方法および検討結果

2.1 使用機器とHTSバルク体の着磁方法

本研究に用いた設備は、HTSバルク磁石 2 個と着磁用のヘルムホルツ型電磁石そして励磁用の直流電源のみである。諸元と実験装置をTable 1, Fig. 1 に示す。バルク

Table.1 Specification of HTS bulk and Helmholtz type electromagnet

HTS Bulk magnet	Helmholtz type electromagnet
Size: 66 mm $\phi$ $\times$ 20 mm height RE-QMG HTS Bulk Magnet (Nippon Steel Corporation)	Gap length: 0 - 37 mm Rating : 100V/10A Magnetic field rate at center position : 35 mT/A @ 23 mmGap

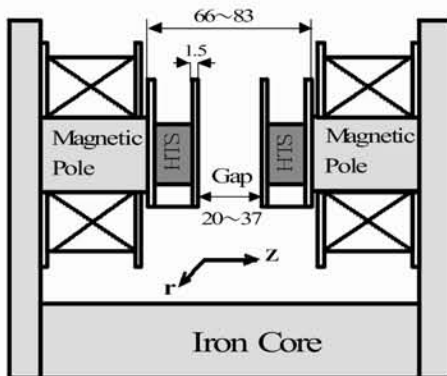


Fig.1 Schematic illustration of magnetization method of HTS bulk magnet.

体の着磁方法はFC法である。その手順は、まずバルク体を冷却用ケース(ベークライト製)に入れ、一定間隔 (20 ~ 37 mm) を保つために間に非磁性材料 (木材を使用) を入れて固定する。つぎに、常温環境下で電磁石を用いて磁場をHTSバルク磁石に加える。この状態にセットした後、液体窒素によりバルク体を冷却して着磁させる。着磁後は、フラックスクリープ等による磁場減衰を考慮して5分間程度放置する。その後、鉄材料を挿入する。Fig. 2 は、こうして浮上させた1例である<sup>7)</sup>。これは、20 mm  $\phi$   $\times$  15 mmHの軟鉄製材料を 25 mmギャップ間

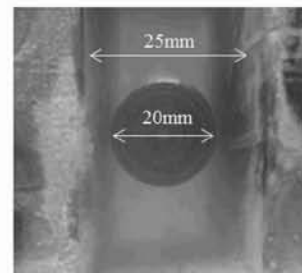


Fig.2 Floating view of soft iron cylinder with 20 mm diameter and 15 mm height, 20 mm  $\phi$   $\times$  15 mmH, where the height of the cylinder is perpendicular to the plane<sup>7)</sup>.

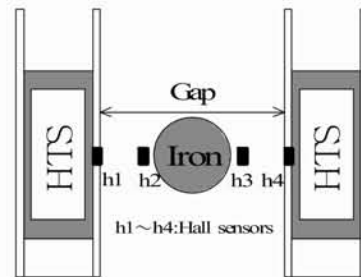


Fig.3 Schematic illustration for the measurement system of magnetic flux density.

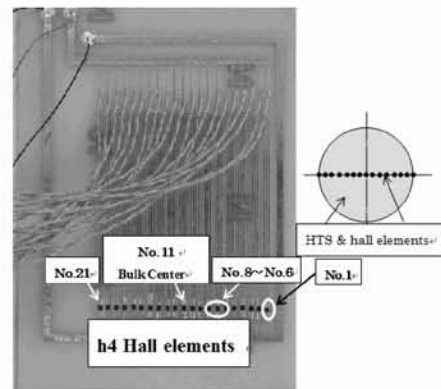


Fig.4 Twenty-first Hall elements on the cooling case (h1,h4); sensor number is assigned from right to left with 3 mm clearance, and the position of No.11 sensor is the central position of the HTS bulk magnet. Measuring magnetic field component is z-direction.

で浮上させたものであり、この鉄円柱は引き込まれるようにして浮上する。浮上は、磁気回路内の磁気抵抗を小さくするように浮上するので、高さが直径よりも短いこの試料では円形部分を正面にして浮上する。

Fig. 3 は、浮上体およびHTSバルク磁石近傍の磁場計測用の概念図である。ここで、h1 と h4 はバルク磁石を冷却するケースに取り付けたホール素子（旭化成電子製；HG106C,寸法 2.5 mm × 1.5 mm, アクティブサイズ: 0.3 mm φ）である。これをFig. 4 に示す。ホール素子の取り付け位置はバルク体の直径上であり、この領域のz方向磁場(Bz) を水平に測定するために 3 mm間隔で合計 21 個取り付けられた。このとき、11 番目がバルク体中央部になる（番号は右から順につけてある）。このホール素子アレイを作成した理由は、浮上体挿入時のバルク磁石近傍の磁場特性を同時計測するためである。

なお、このホール素子の較正には、ヘルムホルツ型電磁石（バルク磁石着磁用）を用いて電磁石の中央部に素子をセットし、ケース内に液体窒素を満たした場合と空の場合について発生磁場に対する起電力を測定して冷却時と室温時の特性とした。このとき、事前にホール素子位置での磁束密度値をガウスメータにより測定している。また、これ以外にギャップ空間の半径方向および軸方向磁場を計測するホールも利用した(h2,h3 には、Lake Shore製HGA-2010, HGT-2010 を使用)。

2. 2 検討結果

これまでの研究で判ったことは、Fig. 2 の浮上にはギャップ間隔と浮上体サイズに一定の関係があるときのみ可能になることである。この関係を浮上体に加わる磁気力特性、浮上体周囲の磁場特性から明らかにした<sup>6,7)</sup>。

そこで、検討を加えていないHTSバルク磁石周辺の磁氣的性質について実験的に実施することとした。

2. 2. 1 強磁性体浮上時におけるHTSバルク磁石周辺の磁場特性

Fig. 5 は、10 mm φ × 10 mmHの鉄円柱を浮上させている状態で鉄円柱をギャップ中心部から右側バルク磁石の方に水平に移動させてホール素子h4 で測定したz軸方向磁場 (Bz) 特性である。浮上状態は、Fig. 2 の写真を 90 度回転させ円形部分がバルク体に平行になる状態である。このとき、着磁電流は 5A, ギャップ間隔は 23 mm, ギャップ中心位置での着磁磁場は 175 mTである。浮上位置はギャップ中央部だが、中心位置からは水平に約 6 mm ずれた位置（ホール素子位置 6 番目～8 番目,高さは 30 mm）であった。この特性から判断できることは、つぎの 2 つである。

- ・ 浮上体がバルク体に接近すると、浮上体の存在する

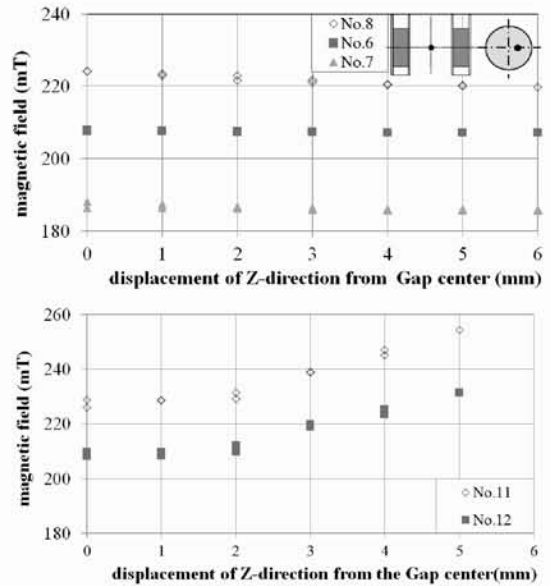


Fig.5 Axial direction magnetic field characteristics, Bz , located at the HTS bulk magnet around; where the size of iron cylinder is 10 mmφ × 10 mmH. (a). Affected region of iron cylinder; where mark (●) shows floating position. (b). Unaffected region of iron cylinder.

領域では、磁石に接近するにも関わらず磁場が弱くなる。

- ・ 浮上体が存在しない領域の磁場は強くなる。

ここで、HTSバルク磁石に近づけたときに磁場が弱まる特性は、バルク磁石の反磁性効果によって誘導された遮蔽電流によるものと考えられ、鉄円柱の存在する領域にのみ現れる局所的な現象である。この実験を超伝導バルク磁石の代わりに電磁石で行うと、浮上体の存在する領域の磁場はFig. 5(b) のように上昇する。このように、一対のHTSバルク超電導磁石を用いるとこれに挟まれたギャップ空間では常電導磁石とは異なる磁氣的な振る舞いを行うことが把握できる。

Fig. 6 は、鉄円柱を磁場空間に挿入して浮上するまでの過渡特性の測定結果である。ギャップ間隔は 20 mm, 浮上体サイズと測定用ホール素子はFig. 5 と同一である。なお、ここでは着磁電流を 3Aに変更してギャップ中心での着磁磁場を 90 mTに変更した。これは、着磁磁場がこの値より高いと磁性体の浮上位置がホール素子のある位置よりも高くなり、浮上体挿入時のバルク体周辺の正確な磁場が把握できないためである。得られた特性から、バルク体にはつぎの 3 つの性質を持つ領域のあることが分かる。

- ・ 浮上体の挿入により磁場の増加が現れ、その後その値が継続する領域 (Fig. 6(a)).
- ・ 浮上体の挿入により磁場の増加が現れ、その後磁場

が減少する領域 (Fig. (b)).

- ・ 浮上体の有無に依らず変化の無い領域 (Fig. 6(c)).
- これらの特性をバルク超電導体の遮蔽効果を基に考察すると以下となる。

磁場中に強磁性体が挿入されると、その周辺では磁束の集中が起こり周辺磁場を変化させる（ここでは浮上体周辺の磁場は増加する）。このとき、バルク体はマイスナー効果により磁性体挿入前の磁場値を保つように振る舞うことが予想される。すなわち、超電導体は磁場変化を遮蔽する。これをFig. 6(b) のNo.6 の特性に当てはめると、鉄円柱挿入直後、磁場値の増加が観測され、その後減少して元に戻る変化を呈している。これは、マイスナー効果の影響が最も顕著に現れている領域と考えられ、No.6 ~ No.8 が同様な変化を示している。そして、このよう

な変化は、この領域以外では観測されていない。

Fig. 6(a) の領域では、磁場値の上昇が見られる。これは浮上体と超電導体間の空間部分において、磁性体から空間に出る磁束の広がりにより現れた変化と考えられる。この変化に対しても超電導体は磁束の侵入を拒むはずであるが遮蔽効果のような変化が現れていない。従って、この領域ではバルク体表面において磁束密度の軸方向成分 ( $B_z$ ) が径方向成分 ( $B_r$ ) へと方向を変えていることが予想される。

このような磁気的な変化が両サイドのHTSバルク磁石に生じると、磁性体は空間で浮上することになる。このように考察するとFig. 5(b) とFig. 6(a), Fig. 5(a) とFig. 6(b) は類似した特性であることが分かる。

### 2. 2. 2 外部磁場重畳時におけるバルク体周辺の磁場特性

小型の磁性体を空間に浮上させるとき、HTSバルク磁石の着磁に用いたヘルムホルツ型電磁石の磁場（これを外部磁場として $B_{ex}$ で表記する）を着磁磁場に重畳させる。こうすると、バルク体周辺の磁場が変化し小型の磁性体も浮上し易くなる。これについては、2.2.4 で詳述する。そこで、ここでは外部磁場重畳時のバルク体周辺の磁場特性について検討しておくこととする。なお、電磁石に通電する電流の向きは着磁時と同一である。

Fig. 7 は、着磁時および外部磁場 ( $B_{ex}$ ) 重畳時の磁場特性である。測定は、左側バルク磁石直径上(高さ 30 mm) を水平に行い、半径方向成分 ( $B_r$ ) と軸方向成分 ( $B_z$ ) を計測した。なお、ギャップ間隔は 20 mm である。得られた特性を以下に示す。

- ① ○印の特性はHTSバルク磁石着磁時の特性である。これは電磁石に 4 A を通電させてギャップ中央部で 121 mT の磁場を発生させている状態である。発生した $B_r$ 成分はバルク体外側が大きく、中心ではゼロとなる分布であり、 $B_z$ 成分は中心が大きく外側に行くに従い小さくなる特性である。
- ② ▲印のフラットな特性は、電磁石に 5.2 A を通電させて①の状態にギャップ中央部で 158 mT の外部磁場を重畳させた特性である。 $B_r$ 成分および $B_z$ 成分共バルク体直径上では一様であり、その値は中央部で $B_r$ 値が 0 mT,  $B_z$ 値が 142 mT である。
- ③ ●印の特性は②の特性から①の特性を引いて外部磁場特性を算出したものである。この特性より、外部磁場を加えるとバルク体全体に着磁時とは逆向きの電流が誘導され、これによる磁場がギャップ磁場を一様にさせる働きをしていることが推定できる。

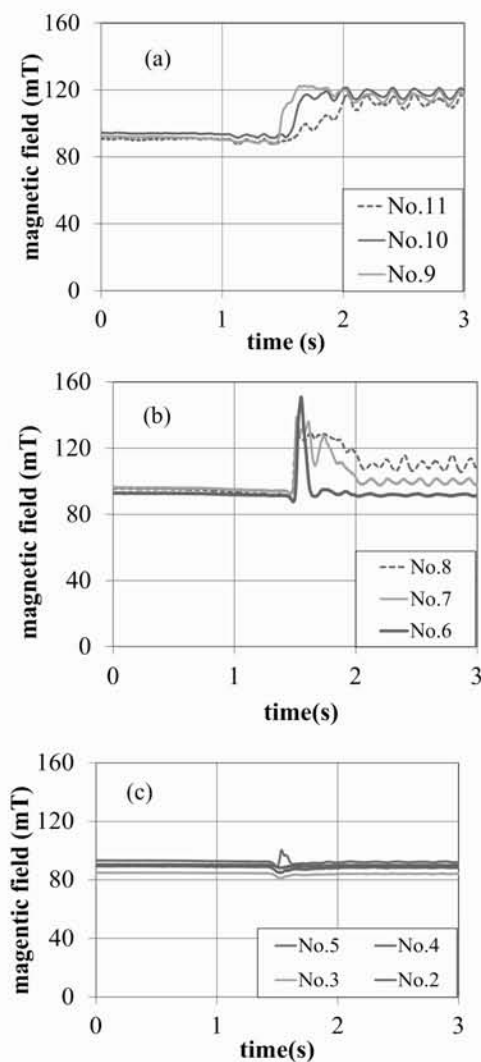


Fig.6 Transient  $B_z$  characteristics nearby the HTS bulk magnet at the time of 10 mm  $\phi$   $\times$  10 mmH iron cylinder insertion. (a). Magnetic field increasing region. (b). Region back to the original magnetic field. (c). Small change region of the magnetic field.

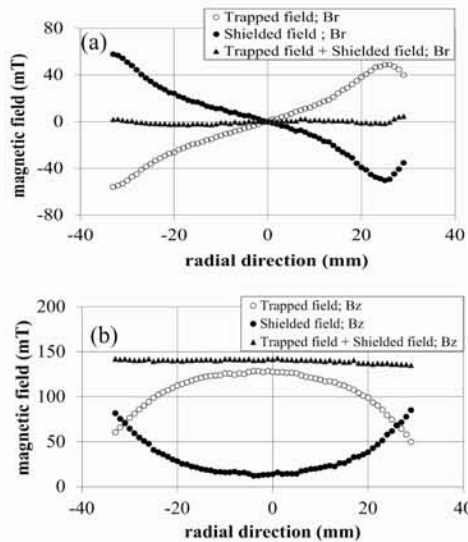


Fig.7 Trapped and shielded magnetic field on the HTS bulk magnet when the external field (Bex) is superimposed on the trapped HTS bulk magnet and uniform magnetic field is generated, where the trapped field is 121mT and Bex is 158mT on the center position of the HTS bulk magnet. (a). Br characteristics. (b). Bz characteristics.

この一様磁場空間中に 6 mmφの鉄球を挿入した特性がFig. 8(a), (b)である。浮上位置はギャップ中央部ではあるが、4, 5 mm中心からZ軸方向左側にずれていた。浮上高さは 20 mmである。測定は、Fig. 7同様左側バルク磁石の浮上位置で行った。Fig. 8(c) は、Br成分およびBz成分の説明図であり、電流はバルク体表面上を時計回りに流れているとしている。このFig. 8(a), (b)の特性から以下のことが分かる。

- ① □印の一様磁場特性は、電磁石に 5.1 A を通電させて外部磁場 153 mTを重畳させた特性である。測定は Fig. 7 に引き続き実施したのだが、若干磁場値が低下したものの、BrおよびBzの両成分ともバルク体周辺で一様になり、その値はBrが-15 mT, Bzが 140 mTであった。
- ② ○印の特性は、一様磁場中に 6 mmφ の鉄球を挿入して浮上させた特性である。このときの浮上状態は以下のものであった。一様磁場中に鉄球を挿入すると、外側の磁場空間では、鉄球はどちらかのバルク磁石に引きつく。しかしながら、磁場空間の中心部にまで鉄球を持ち込むと、鉄球は浮上しはじめる。このとき、浮上が安定するまでに 5 秒程度かかった。これは磁場の均一化が影響して、浮上安定位置が定まりにくいことが原因していることが考えられる。なお、着磁磁場のみでは浮上体はバルク磁石に引きついたままである。

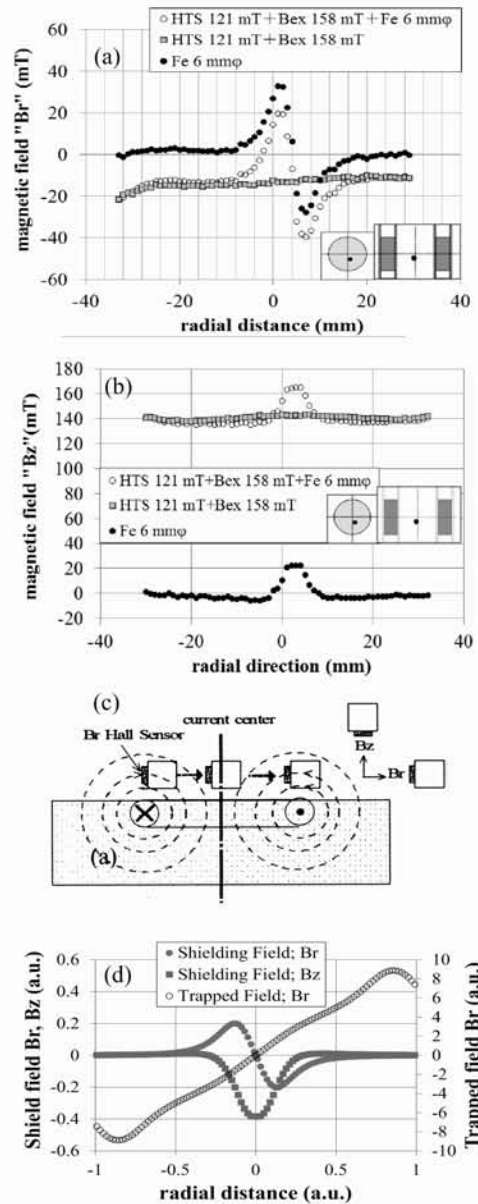


Fig.8 Br and Bz characteristics nearby the HTS bulk magnet superimposed on the external magnetic field, Bex, with and without iron sphere of the 6 mmφ. (a). Br characteristics; where mark (●) shows floating position. (b). Bz characteristics. (c). Explanation of the sign of Br and Bz components between experiment and calculation. (d). Calculation results of the magnetic field, where the mark (○) shows the trapped field of “Br” and the mark (●) and (■) show the shielding field of “Br” and “Bz” respectively. The trapped field is calculated assuming a distributed current over the HTS bulk magnet. On the other hand, the shield current is one turn ring current on the radius of 0.1 and the direction of the current loop is clockwise direction. The z-position from the HTS bulk surface is 0.2, which means nearby the HTS bulk.

③ ●印の特性は、浮上体のみの特性を抽出したものであり、②から①を差し引いて求めた特性である。

この③で取得した浮上体のみの特性とFig. 7の着磁時特性より、着磁時と浮上時の磁場特性について検討すると以下のことが分かる。

- ・ 着磁時のBr特性 (Fig. 7(a)○印) は、中心から右側が正、左側が負の特性であるのに対してFig. 8(a)の浮上体のみのBr特性 (●印) は、中心が半径方向に4 mm程ずれてはいるが、中心から右側が負、左側が正の特性であり、着磁時とは符号が異なる。
- ・ Fig. 8(b)の浮上体のみの特性 (●印) は、中心での磁場値が正方向に強くなる特性である。

これらの特性を検証するために、浮上体挿入時にバルク体に誘導される電流について計算による検討を試みた。

Fig. 8(d) は、このときの計算結果である。計算方法は、半径aの円形電流が任意の点P(r, θ, z)につくるベクトルポテンシャルを求め、これの回転から磁束密度を算出する方法とした。座標系は円筒系とし、r成分およびz成分のベクトルポテンシャルがゼロになることを考慮してθ成分のみを対象とした。利用したベクトルポテンシャルA<sub>θ</sub>は式(1)である<sup>8)</sup>。

$$A_{\theta} = \frac{\mu_0 i}{\pi k} \sqrt{\frac{a}{r}} \left\{ \left(1 - \frac{k^2}{2}\right) K(k) - E(k) \right\} \quad (1)$$

(a)

ここで、 $k^2 = \frac{4ar}{\sqrt{(a+r)^2 + z^2}}$ 、なおK(k), E(k)はkを母数とする第1種、第2種の完全楕円積分である。そして、磁束密度は式(2)を用いた。

$$\mathbf{B} = \text{rot } A_{\theta} = -\frac{\partial A_{\theta}}{\partial z} \mathbf{i}_r + \frac{1}{r} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} (r A_{\theta}) \right\} \mathbf{i}_z \quad (2)$$

(b)

ここでは、2種類の計算を実施した。一方は、着磁時のBr特性である。これは、バルク体の半径を1.0とし、ここに同心状の円形電流が分布して流れている状態を想定した。電流の大きさは、0.1 ~ 0.7が0.33、その外側の0.8 ~ 1.0までは1.0である。これは、Fig. 7(b)の着磁時のBz特性を用いて臨界状態モデルを想定し、バルク体の内側と外側の磁場勾配を1対3として算出した。なお、電流の向きは反時計回りである。

他方は、遮蔽電流を想定して計算したもので、HTSバルク体の大きさは半径1で着磁時と同一にし、浮上体の大きさに相当する半径0.1のところの1ターンの円形電流が原点を中心に時計回りに流れている状態を想定した。計算した磁場値は、Br成分とBz成分である。なお、両計算におけるz方向位置は、バルク磁石間の間隔を2とした

ときに0.2の位置である。

Fig. 8(d)の計算結果を考慮してFig. 7(a), Fig. 8(a),(b)の特性についてまとめると以下のことに気づく。

- ・ 着磁時および浮上時のBr特性は、実験値と計算値が類似した特性となり、着磁時はバルク体には分布電流が流れていることがわかり、鉄球挿入時は浮上体の大きさに相当する領域に着磁時とは逆向きの遮蔽電流が誘起されていることが分かる。
- ・ Bz特性は問題があり、測定した磁場の向きは、想定した遮蔽電流が作る磁場の向きとは異なることに気づく。すなわち、測定した磁場特性は遮蔽電流によるもので無い。

ここで、後者について再検討する。測定は6 mmφの鉄球が中央で浮上している状態で行った。このとき、浮上体周辺磁場は鉄球が存在することにより、局所的に増加する。また、両サイドにはHTSバルク磁石があるのでバルク体周辺では変化磁場を遮蔽する電流が存在する。

この点を考慮すると、測定したBz成分は鉄球の存在による正方向磁場の増加分と遮蔽電流による負方向磁場の減少分を重ね合わせた特性になる。従って、Fig. 8(b)で抽出した浮上体のみのBz特性は、浮上している磁性体の磁場増加成分を主として検出した特性であることが考えられる。

このことを考慮して浮上体に加わる軸方向磁気力F<sub>z</sub>について考察すると以下のことが推定できる。

磁気力は、式(3)に示すように磁場Bとその勾配に比例する。従って、浮上体がバルク磁石に接近すると、浮上体左右の磁束密度の強さが変わり、バルク磁石より離れた側が接近した側よりも強いと浮上体はギャップ中心部方向に移動することが考えられる。そして、磁性体は周辺磁場を上昇させ、超電導磁石は近傍磁場を遮蔽する。ここにギャップ空間を一様にさせる効果が加わると、浮上しやすい状態を引き出し易くなることが推測できる。

$$\mathbf{F}_z \propto \mathbf{B} \frac{dB}{dz} \quad (3)$$

また、軸方向磁気力について別の見方をすると、浮上体をギャップ中央に移動させる力は、式(4)に示すようにバルク磁石内に発生した遮蔽電流(I<sub>sh</sub>)とI<sub>sh</sub>を横切る半径方向磁場Brのベクトル積で表せる。

$$\mathbf{F}_z \propto \mathbf{I}_{sh} \times \mathbf{B}_r \quad (4)$$

これより、バルク体に加わる力と浮上体に加わる力についてFig. 8(a),(d)を用いて検討すると以下になる。

遮蔽電流の向きは時計回りである。着磁時のBr磁場は、

左側バルク磁石の場合バルク体中心に放射状内側に入る向きである。従って、HTSバルク磁石には、マイナスz方向に力が加わる。この力は、バルク磁石の間隔を広げる方向である。しかしながら、バルク磁石は固定されていて移動できない。こうなると、この力は浮上体をギャップ中央に押し戻す反作用力になる。

このように想定すると、磁気力が左右のバルク磁石に均等に加わる位置ではその力は打ち消し合うことになる。すなわち、ギャップ中心部では浮上体は浮上できないことが予想される。Fig. 9 は、これについて検討した結果である。着磁磁場は 90 mT (ギャップ中央部)、浮上体は 10 mmφ × 10 mmH の鉄円柱である。ここで、電磁石の磁極中心とバルク体の中心は一致させている。そして、鉄円柱の浮上状態を変化させるために電磁石の電流を変化させてBr成分を測定した。測定場所は、バルク体直径上を水平に 10 mm ~ 30 mmまでを 5 mm間隔で行った。その結果、電流の増加とともに各位置でのBr値が一定値に収束していき 3.3Aのとき鉄円柱は中央部で落下した。当初Br値がゼロとなる場所で落下すると予想したが、やや設定がずれたようである。しかしながら、浮上体は、中心位置では浮上できないことが判断できたと考えており、Fig. 5,6 およびFig. 8 において中心からずれて浮上する理由が把握できたと考えている。

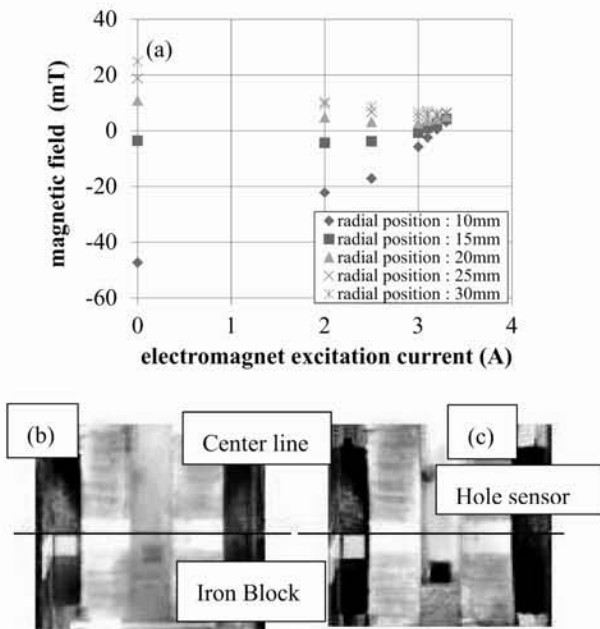


Fig.9 Br characteristics around the HTS bulk at the time of the electromagnet excitation current ( $I_{mag}$ ) increasing, where floating iron size is 10 mmφ × 10 mmH and the current for the trapped field of HTS bulk is 3 A, that is the value of 90 mT at gap center. (a). Br characteristics on the radial position of the HTS bulk magnet. (b).  $I_{mag}$  is 3A. (c).  $I_{mag}$  is 3.3A.

### 2. 2. 3 ギャップ空間磁場の均一化

外部磁場は、HTSバルク磁石周辺の磁場を一様にさせる働きのあることが分かった。Fig. 7, 8 でこれを確認した。そこで、この効果がギャップ空間ではどのようなになっているか測定した。これを行うにあたり、HTSバルク磁石の着磁法について再考する。

実施した着磁法は、フィールドクール法 (FC法) である。その後、新たに電磁石の磁場を加える段階は、超電導状態下での外部磁場増磁過程である。これは、HTSバルク体着磁法の 1 手法であるゼロフィールドクール法 (ZFC法) の増磁過程と類似している<sup>9)</sup>。ここで重要なことは、FC法時と外部磁場増磁時の電流の向きである。外部磁場を加えるときは、バルク体には着磁時とは逆向きの電流が流れる。これは、着磁磁場を弱める作用をするが、外部磁場を加え続けている状態では空間磁場を一様にさせる効果が期待できる。なお、我々は電磁石の配線を一切変更していない。

Fig. 10 は、これを実施した特性であり、着磁後のHTSバルク磁石に外部磁場 ( $B_{ex}$ ) を印加して空間磁場がどう変化するかを計測した結果である。ここで、着磁磁場はギャップ中心で 121 mT、 $B_{ex}$ 値はゼロから着磁磁場以上まで加えている。なお、測定はHTSバルク磁石間中心軸上の $B_z$ 成分である。これより、 $B_{ex}$ の大きさによりギャップ空間磁場が変化し始め、 $B_{ex}$ 値 160 mTのとき中央部の磁場値に対し左右 8 mmの間隔においてほぼ均一な磁場特性が得られた。このとき、磁場均一度は平均値 139 mTに対して最大 1.7 mTのばらつきがあり、 $B_{ex}$ 値が 165 mTになると均一性は失われた。

### 2. 2. 4 小型強磁性体の浮上制御

一定のギャップ中で軟鉄材料を浮上させるとき、ギャ

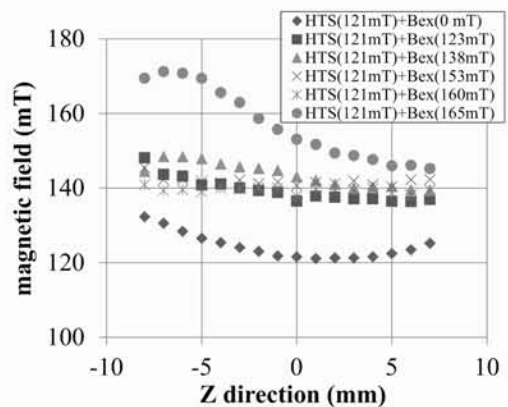


Fig.10  $B_z$  characteristics on the central axis between a pair of HTS bulk magnet when an external magnetic field,  $B_{ex}$ , is changing.

ップ間隔と浮上体サイズの間には密接な関係が存在する。すなわち、ギャップ 20 mm の場合 10 mm φ × 10 mmH 鉄円柱は浮上するが、半分の 5 mm φ × 5 mmH にすると浮上できずにバルク磁石に引きついてしまう。そこで、ギャップ間隔を変えずに、より小さい磁性体を浮上させるために外部磁場 (Bex) を重畳させて空間磁場の一様化させることで浮上するかを実際に検討した。

Fig. 11 は、5 mm φ × 5 mmH の鉄円柱を用いて実施した結果である。着磁磁場は、ギャップ中央部で 175 mT、ここに Bex をギャップ中央部で 0 ~ 200 mT まで増加させた。測定は、左側冷却ケースに取り付けたホール素子 (Fig.3 の h1) で行った。このときの浮上体の状態を I ~ V に分けて検討する。

- I と II の状態は、着磁時の 5 mm φ × 5 mmH の鉄円柱挿入時の特性である。このとき、浮上体は左側のバルク磁石に引き付いている。
- III の状態は、Bex を加えて着磁時と同じ磁場値まで上昇させている段階である。このとき、浮上体はまだバルク磁石に引き付いたままである。
- IV の状態 (100 ~ 250 s) は、Bex 値を着磁磁場以上の 175mT まで加えている状態で、鉄円柱が浮上しはじめて中央に移動している段階である。このとき、浮上体はバルク磁石から離れていくにも関わらず磁束密度は低下せずやや上昇した後に一定値を保っている。
- V の状態は、浮上体を取り出した状態である。

ここで、IV の段階が小型の強磁性材料の浮上において重要となる。この点について考察すると以下となる。

磁性体挿入時、HTS バルク磁石には浮上体の直径に相当する領域に遮蔽電流が誘導される。この電流は、直近の磁場を変化させるように働くが浮上させるまでには至っていない。ここに、外部磁場を加えて着磁磁場以上になるとバルク磁石近傍を含め空間磁場が一様化してくる。これにより、浮上体表面に誘導された遮蔽電流による効果がより強く現れ、バルク磁石に接近した側よりも反対側の磁場値が大きくなる状態を作り出していることが想定される。特に、バルク磁石から離れていくにも関わらず、磁場が上昇している段階は、これを示しているものと考えられる。

### 2. 2. 5 磁性粒子の移動

これまでの検討より、一対の HTS バルク磁石を用いて一定のギャップ中で大きさの異なる強磁性材料を浮上させるには、外部磁場を重畳させて空間磁場値を一様化させ、磁性体挿入時に HTS バルク磁石に誘導される遮蔽効果を積極的に引き出すことで可能になることが分つてき

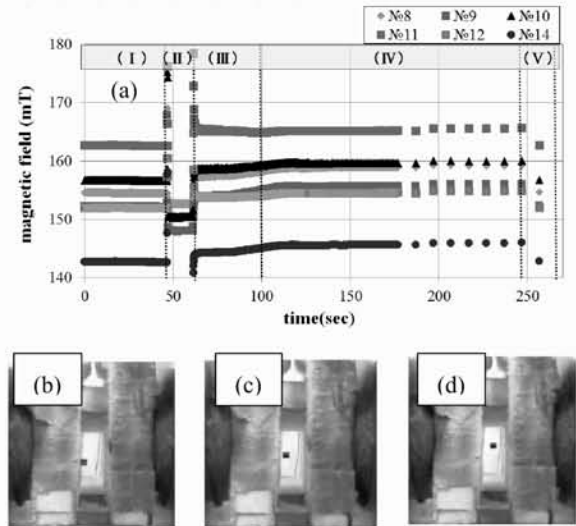


Fig.11 Floating characteristics of 5 mmφ × 5 mmH iron cylinder, where firstly floating object is attached on the left-hand-side HTS bulk magnet and when the electromagnet is excited more than trapped magnetic field, Bex is 175 mT, iron object start to landing and moving to the central position; ( I ):initial state, ( II ): iron cylinder insertion, ( III ): Bex increases from 0 to 175 mT, ( IV ): Bex increases from 175 to 200 mT, and ( V ): Bex decreases zero and iron cylinder removed. (a). Magnetic field characteristics of “h1” hole sensors attached on the left hand side of HTS Bulk cooling case. (b). Bex is 0 mT. (c). Bex is 180 mT. (d). Bex is 200 mT.

た。しかしながら、この外部磁場の重畳は、超電導状態の HTS バルク磁石からすると全体的な遮蔽効果であり、FC 時の着磁磁場を弱めることになり、強い磁場空間は作れない。たとえ強磁場が発生できたとしても、一様磁場のみでは浮上体サイズが小さくなると磁場変化が少なくなり、遮蔽電流値の大きさもループ半径も小さくなる。これでは小型の強磁性体は浮上できない。

そこで、一様磁場を利用して、より小さな磁性粒子を浮上させるには、一様の磁場空間に加えて磁場勾配を積極的に作るための補助磁性材料が必要であると考えた。現状において、我々は一様磁場空間の発生方法を習得している。これを用いて、新たに空間に磁場勾配を作れば、そこに軽い磁性体を引き付けることができると考えた。すなわち、一様磁場空間に新たに強磁性材料を持ち込めば、これが磁化して新たな磁場環境を作り、ここに磁性粒子を移動させることが可能になると考えた。

これを確かめたのが Fig. 12 である。実施方法は、着磁磁場 100 mT (ギャップ中央部) で HTS バルク磁石を着磁させた後、外部磁場 (Bex) を加えて空間磁場を一様化 (Bex 値はギャップ中央部で 128 mT) させた。そして、この一



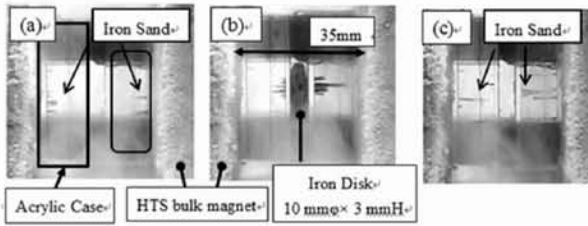


Fig.12 Movement of magnetic particles in a uniform magnetic field through the use of iron disk (10 mmφ × 3 mmH). (a). Initial condition (HTS 100 mT + Bex 128 mT). (b). Iron disk insertion. (c). Iron disk removal and Bex is 0 mT.

様磁場空間にアクリルケールに入れた砂鉄を左右に配置し、中央部に磁性体が挿入できる 5 mm の隙間を確保した。挿入する磁性体は直径 10 mm 厚さ 3 mm の軟鉄製円盤である。なお、ギャップ間隔は 35 mm に広げている。

これより、砂鉄は HTS バルク磁石のみの磁場および Bex を加えて空間磁場を一様化させただけでは両サイドのバルク磁石に引きついたままであったが、中央部に軟鉄製円板を挿入すると円板の方に移動することを確認した。そして、この中央に移動した後、鉄円盤を取り除き、更に Bex 値をゼロにして着磁磁場のみの状態にしたときにおいても、磁性粒子の一部は移動した状態を保っていることが分った。これは、磁気抵抗の小さい状態が 1 度形成されると、その状態が維持し易くなることを示しているものと考えられる。

### 3. まとめ

本研究は、一対の着磁した HTS バルク磁石と電磁石を用いて軟鉄製材料の浮上と制御について検討したものである。得られた結果をまとめると以下となる。

- ・ 着磁した HTS バルク磁石とこれを励磁する電磁石を併用すると、これらが作る磁場環境下において磁性材料を浮上、制御させることが可能になる。
- ・ 本手法では、バルク超電導体の磁気遮蔽効果が大きく寄与する。
- ・ 浮上体挿入時の遮蔽電流は局所的に発生する。そして浮上体の形が円柱や球の場合、遮蔽電流ループの大きさは浮上体形状にほぼ等しくなる。
- ・ 電磁石の磁極中心とバルク体の中心を一致させると、ギャップ中央中心部では浮上しない。
- ・ 浮上体の大きさと HTS バルク磁石の間隔は密接に関係する。このとき、ギャップ間隔を一定に保ったまま、より小型の強磁性体を浮上させるには着磁時に用いた電磁石を併用して HTS バルク磁石間の磁場空間を一様にさせることが効果的である。

- ・ 一様磁場中に新たに鉄円盤のような補助強磁性体を挿入すると、磁性粒子を磁場空間中で移動させることが可能になる。そして、一度磁性粒子を移動した後は、外部磁場や補助強磁性体を除去しても一部の磁性粒子は移動した状態を維持する。

### 参考文献

- 1) M. Tsuda, et al.: "Application to Magnetic Levitation," TEION KOGAKU 46(2011) 94-101(in Japanese)  
津田 理ら:「磁気浮上応用」低温工学 46 (2011) 94-101
- 2) M. Strasik, et al.: "Design, Fabrication, and test of a 5-kWh/100-kW flywheel energy storage utilizing a high-temperature superconducting bearing", IEEE Trans. Appl. Supercond. 17(2007) 2133-2137.
- 3) T. Takao, et al.: "Experimental and Numerical Analysis of Lift Force in Magnetic Levitation System", IEEE trans. Appl. Supercond. 15(2005) 2281-2284
- 4) H.Ohsaki, et al.: "Stable Magnetic Levitation of Soft Ferromagnetic Materials by Flux Pinning of Bulk Superconductors," IEEE Trans. Mag, 33(1997) 3454-3456.
- 5) Y. Tsutsui, et al.: "Improvement of Maglev Model Using High-Tc Superconductors and Soft Magnetic Materials," TEION KOGAKU 31(1996)61-65(in Japanese)  
筒井 幸雄ら:「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 31(1996) 61-65
- 6) Ryoma Higuchi, et al.: "Levitation Experiment of Iron Block using Pinning Flux in HTS Bulk Material," IEEE Trans. on Appl. Supercond. 19(2009) 2129-213
- 7) Ryoma Higuchi, et al.: "Magnetic Levitation of Ferromagnetic Block using Trapped Field of Bulk High Temperature Superconductors J.Fac.Sci Tech., Seikei Univ.46(2009)13-18 (in Japanese) 樋口涼馬ら:「バルク高温超電導体の捕捉磁束を用いた強磁性体の浮上実験」成蹊大学理工学研究報告 46(2009)13-18
- 8) 竹山説三「電磁気学現象理論」246-249
- 9) H.Fujishiro: "Magnetization of Superconducting Bulks" TEION KOGAKU 46(2011)81-88(in Japanese)  
藤代 博之「バルク超電導体の着磁現象」低温工学 46(2011)81-88.