

複数のバルク超電導体と電磁石を用いた アクティブ磁気浮上システムにおける バルク超電導体の最適配置

津田 理 (電気電子工学科) 土谷 浩平 (電気電子工学科)
原田 直幸 (電気電子工学科) 浜島 高太郎 (電気電子工学科)

The optimum arrangement of HTS bulks in an active-maglev system composed of multiple HTS bulks and electromagnet

Makoto Tsuda (Department of Electrical and Electronic Engineering)
Kohei Tsuchiya (Department of Electrical and Electronic Engineering)
Naoyuki Harada (Department of Electrical and Electronic Engineering)
Takataro Hamajima (Department of Electrical and Electronic Engineering)

We investigate the most suitable arrangement of HTS bulks in an active maglev system comprised of multiple HTS bulks and an electromagnet. We measured levitation height and trapped field distribution of a field-cooled bulk as a function of the location of the bulk in the radial direction of the electromagnet. In spite of unstable levitation, the levitation height at the same operating current was increased with the distance between the axes of the bulk and the electromagnet. The levitation force was closely related to the distance among the bulks and the interaction among the bulks was observed when the distance is small. The maximum levitation force was obtained when the bulk was located near the inner boundary of the windings. This implies that the location of multiple bulks realizing the maximum levitation force is closely related to the sizes of electromagnet such as thickness, inner and outer radii and the most suitable arrangement of multiple HTS bulks can be obtained by considering the magnetic field distribution generated by the electromagnet.

Keywords: HTS bulk, YBCO, magnetic levitation, bulk arrangement, levitation force

1. はじめに

高温超電導 (HTS) バルク体 (以下, バルク体と称す) の超電導特性の向上に伴い, バルク体応用実現への期待が高まっている。これまでに, フライホイール電力貯蔵装置などの磁気軸受け, モータ, 磁気搬送装置などへの応用について様々な検討が行われており¹⁻³⁾, 筆者等も, 電磁石 (以下, コイルと称す) とバルク体とで構成されるアクティブ磁気浮上システムを用いて, バルク体の基礎的な電磁特性から浮上搬送装置・アミューズメント分野への応用に至るまで様々な検討を行ってきた⁴⁻⁹⁾。しかし, 現在使用可能なバルク体の大きさは, これらのバルク体応用の実用化にはまだ不十分であるため, これらの実用化にはバルク体の大型化が不可欠となる。近年のバルク体製造技術の向上に伴い, バルク体の性能も着実に向上しており, マルチ種付けによって特性を劣化させることなく大型のバルク体を作れることが報告されているが¹⁰⁾, バルク体単体の大型化に関しては, 製造技術のみならず経済性の問題が未解決のままとなっているのが現状である。こうした背景から, 現在, バルク体接合や複数のバルク体を組み合わせて使用する方法について様々な検討が行われている¹¹

^{12,13)}。アクティブ磁気浮上システムに関しては, これまでに複数のバルク体を組み合わせて使用する方法について検討されているが, これらのほとんどは大きなバルク体単体の代用を目的としており, バルク体を隣接させて配置する場合についてのものがほとんどであった。しかし, このように複数のバルク体を隣接させて配置しても, 浮上部全体の浮上力は, 同サイズのバルク体単体の半分程度にしかならないことが報告されている^{12,13)}。また, 単位体積当たりの浮上力という観点では, 円柱型のバルク体よりもリング型のバルク体の方が優れているという報告もある⁷⁾。こうした理由により, 複数のバルク体を組み合わせて使用する場合にバルク体を隣接させて配置することが, バルク体を効率よく浮上させるための有効な手段であるとは言い難い。そこで, 本研究では, 複数のバルク体を用いて, バルク体の最適配置について検討することにした。具体的には, まず, 複数のバルク体を組み合わせて使用する際に, バルク体が経験する非対称磁場分布に着目し, 非対称磁場中で着磁したバルク体の電磁的振る舞いについて検討した。また, その結果を踏まえ, 4個のバルク体を用いた4種類のバルク体配置について浮上力を比較した。

そして、バルク間距離を変化させた場合の浮上力を測定し、バルク間の相互作用とバルク体の浮上力の関係、ならびに最大の浮上力を与える最適なバルク間距離について考察した。

2. 非対称磁場で着磁した場合の浮上特性

ソレノイドコイルを用いたアクティブ磁気浮上システムにおいて、バルク体を安定に浮上させるには、コイルとバルク体の中心軸を一致させた状態でバルク体を着磁し、着磁時と同じ場所から浮上させることが望ましい。しかし、浮上部分を複数のバルク体で構成する場合、各々のバルク体の経験する磁場分布(着磁時も含む)は非対称になることが考えられ、このような電流分布や磁場分布の非対称性は、浮上力や浮上安定性と密接に関係することが予想される。そこで、非対称磁場中でのバルク体の電磁的振る舞いについて検討した。

2.1 コイル中心から浮上させた場合の浮上高さ特性

本実験では、直径29.0 mm、厚さ10.6 mm、重さ0.395 Nの円柱状のYBCOバルク体を使用した。また、着磁および浮上に使用したコイルは、内径200 mm、外径500 mm、厚さ55 mm、巻線数3486の銅製のソレノイドコイルである。このコイルの発生磁場は、コイル電流が10 Aの時に、コイル中心軸上でかつコイル表面より1 mm上空で125 mTである。これらを用いて、Fig. 1に示すような磁気浮上システムを構成した。コイル電流の測定にはシャント抵抗を用い、バルク体の浮上高さの測定には定規を用いた。バルク体への着磁は、コイル電流が設定電流(本実験では10 Aを採用)に到達してから、常電導状態のバルク体を予め決められた場所(液体窒素中)に置くことにより超電導状態にし、十分時間が経過してからコイル電流を0 Aまで下げるといった方法で行った。着磁位置

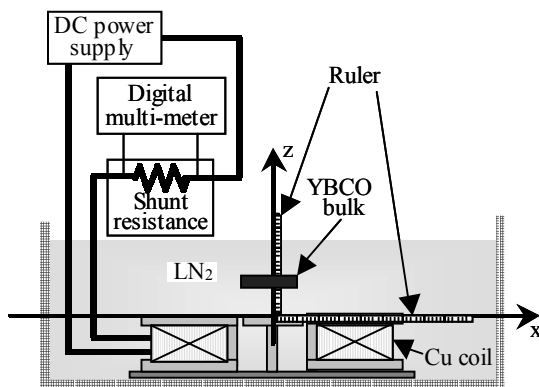


Fig. 1 Schematic drawing of an experimental setup for a levitation height measurement.

(コイルとバルク体の中心間距離) x_0 は、それぞれ0 mm, 50 mm, 100 mmとした。

まず、着磁時と同じ位置からバルク体を浮上させることを試みた。しかし、 $x_0=50$ mmと100 mmで着磁した場合は、バルク体が浮上する前にコイル中心方向へ移動するという結果となった。このように、非対称磁場中で着磁し、着磁位置から浮上させようとしても、バルク体は安定に浮上しないことがわかった。そこで、着磁終了後にバルク体をコイル中心軸上に移動させ、コイルに通電することで浮上高さ特性を測定することにした。その結果をFig. 2に示す。

これより、バルク体の着磁位置がコイル中心より離れるにつれて(着磁時の磁場分布の非対称性が大きくなるにつれて)、同じ浮上高さを実現するのに必要となるコイル電流が上昇することがわかった。また、着磁位置に関係なく、浮上する前にバルク体が反時計回りに約90度回転し、ある傾きを持ったまま浮上することが確認された。 $x_0=50$ mm, 100 mmで着磁した場合の、浮上時のバルク体の水平面からの傾きは、それぞれ6度、24度であった。これは、非対称磁場中で着磁することによって、バルク体内の電流分布がバルク体の中心軸に対して非対称となり、着磁時の磁束密度が最大となる領域(コイルの中心から最も離れている領域)と小さくなる領域(コイル中心に一番近い領域)に働く浮上力に差が生じるためであると考えられる。次に、このような非対称磁場中でのバルク体の電磁的振る舞いを把握するために、非対称磁場中で着磁したバルク体表面付近における磁場分布測定を試みた。

2.2 バルク体の着磁分布

コイル中心よりそれぞれ50 mm, 100 mm, 150 mm離れた場所でバルク体を着磁し、ホール素子を用いてバルク体表面より1 mm上空における磁場分布測定を試みた。測定には、2 mm × 2 mmのホール素子を2 mm間隔で計10個配置したのものを用いた。その結果をFig. 3に、また、コイルの発生磁場の軸方向成分(B_z)の計算結果をFig. 4に示す。Fig. 3において、図の左側

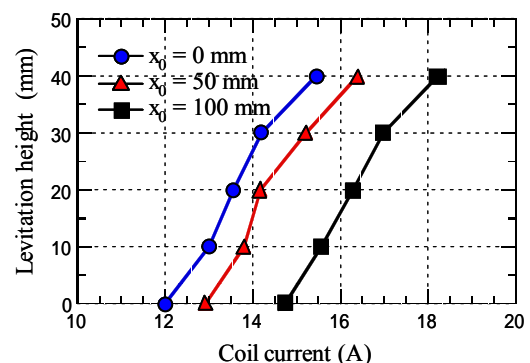


Fig. 2 Dependence of levitation height on magnetic field distribution in a field-cooling process.

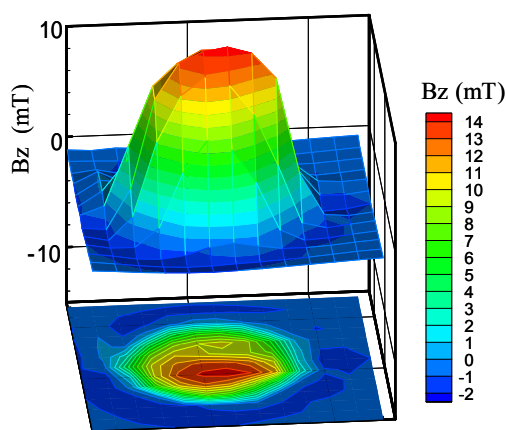
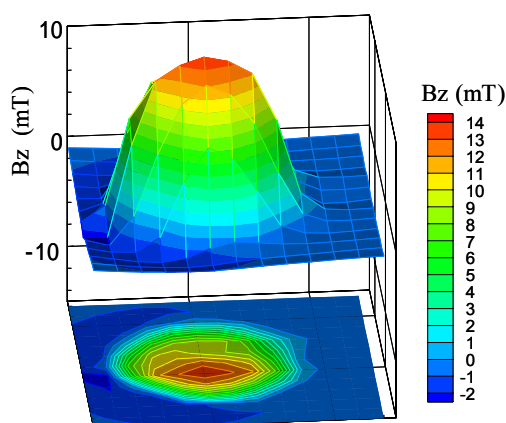
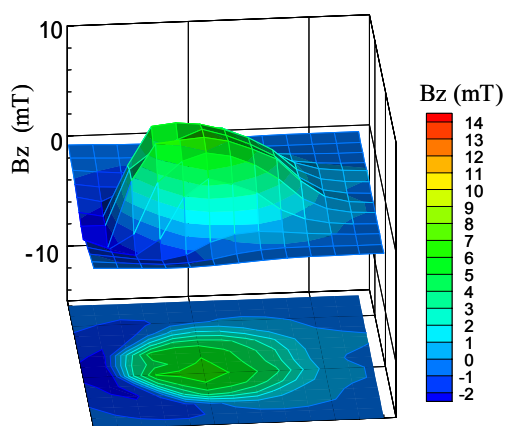
(a) $x_0 = 50$ mm(b) $x_0 = 100$ mm(c) $x_0 = 150$ mm

Fig. 3 Magnetic flux density distribution above a bulk exposed to an asymmetric magnetic field in a field-cooling process.

がコイル中心側、右側がコイル外側を表している。これより、わずかではあるが、 $x_0 = 50$ mmの場合はコイル外側（図右側）の方がコイル中心側より磁場勾配が大きくなったのに対し、 $x_0 = 150$ mmの場合はこれとは反対にコイル中心側がコイル外側よりも磁場勾配が大きくなった。これに対し、 $x_0 = 100$ mmでは、磁場勾配がほとんど同じになった。Fig. 4において、 $x_0 = 50$ mmではコイル外側の方が B_z が大きくなるのに対し、

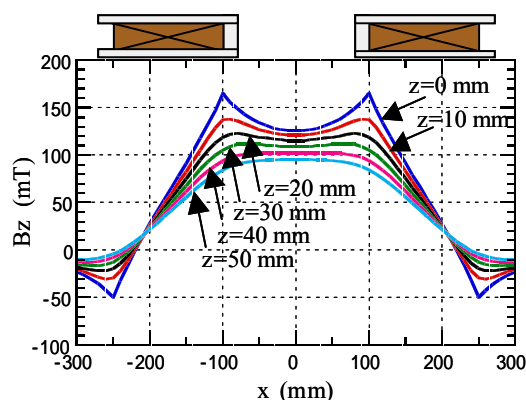


Fig. 4 Computed plots of B_z at a coil current of 10 A.

$x_0 = 150$ mmではコイルの中心側の方が大きくなっていることから、着磁時のコイル磁場が大きい領域ほど着磁分布の磁場勾配が大きくなることが考えられる。以上のことから、Fig. 3の $x_0 = 100$ mmでの着磁分布の勾配がほぼ等しいのは、Fig. 4において $x_0 = 100$ mm付近が B_z 分布のピーク領域に相当し、バルク体の両端での B_z がほぼ等しくなるためであると考えられる。

2.3 着磁位置における浮上力特性

2.1の実験では、バルク体の浮上特性が着磁時の磁場分布の非対称性に依存する結果となったが、それらはバルク体の着磁位置と浮上開始位置が異なる場合についてであった。しかし、実際にバルク体応用で複数のバルク体を組み合わせて使用する場合はほとんどは、バルク体の着磁位置と使用位置が同じであることが予想される。そこで、バルク体の着磁位置と浮上開始位置を同じにした場合について浮上特性試験を試みた。しかし、前述の通り、バルク体をコイル中心から離れた場所から浮上させようとしても安定には浮上しないことから、本実験では、Fig. 5に示すように、ロードセルを用いて浮上力を測定することにした。実験は、コイル中心よりそれぞれ0 mm、50 mm、100 mm、150 mmの位置でバルク体を着磁し（着磁電流は10 A）、着磁後にロードセルに固定した

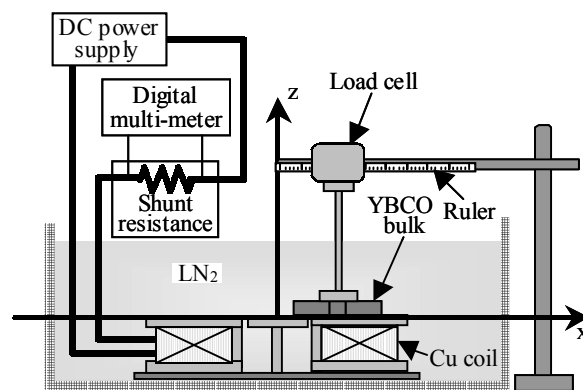


Fig. 5 Schematic drawing of an experimental setup for a levitation force measurement.

木製の棒をバルク体の上表面に固定してからコイルに通電することで浮上力を測定するという方法で行った。コイル電流の測定にはFig. 1におけるシャント抵抗を用い、電流測定用のシャント抵抗の両端電圧と、ロードセルからの出力をデジタルスコープを用いて測定した。その結果をFig. 6に示す。Fig. 6より、コイル中心で着磁した場合よりも、非対称磁場中で着磁した方が浮上力が大きくなることがわかった。また、今回の測定では、 $x_0=100$ mmで着磁した場合に浮上力が最も大きくなった。これより、複数のバルク体を組み合わせて使用する場合は、バルク体をコイル中心から離れた位置で使用する方がバルク体の浮上効率が上がることがわかった。しかし、この場合は、バルク体自身では浮上安定性を確保することができないため、安定性を確保する手段を別途講じる必要がある。

3. 複数のバルク体配置と浮上特性

バルク体応用の実現にはバルク体の大型化が不可欠となるが、超電導特性を劣化させることなく用途に応じた大きさのバルク体を作ること、非常に困難である。このため、磁気浮上システムにおいても、これまでに複数のバルク体を用いる方法について検討されてきた^{9,10)}、それらは複数のバルク体を用いて等価的に大きなバルク体を形成することを目的としていたため、バルク体同士を隣接させて用いる場合がほとんどであった。しかし、バルク体をコイル中心から離れた位置で着磁する方が浮上力が大きくなることを考えると、バルク体間距離と浮上特性との関係を明確にしておく必要がある。そこで、新たにTable 1に示すような4個のバルク体を用意し、Fig. 7に示すような4種類の組み合わせについて浮上特性を調べることとした。また、Fig. 7のType Bにおいて、バルク体間距離を変化させた場合の浮上特性を調べ、複数のバルク体を組み合わせて使用する場合の浮上特性とコイル磁場分布との関連性について考察することとした。

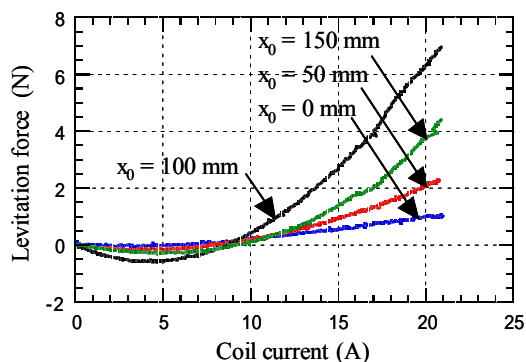


Fig. 6 Dependence of levitation force on magnetic field distribution in a field-cooling process.

Table 1 Specifications of YBCO bulks.

No.	Diameter (mm)	Thickness (mm)	Weight (N)
90	31.5	11.4	0.493
91	31.6	11.5	0.487
92	31.8	11.2	0.488
93	31.3	11.7	0.492

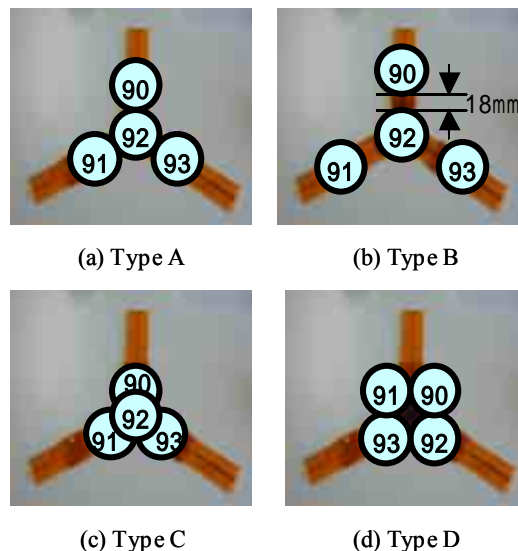


Fig. 7 Top view of four types of bulk arrangements used in experiments.

3.1 バルク体単体における浮上特性

複数のバルク体を組み合わせて使用する場合は、浮上安定性の観点から、電磁特性にばらつきのないバルク体を使用することが望ましい。そこで、Table 1に示すバルク体単体の電磁特性を調べるために、各バルク体において着磁電流を10 Aとした時の浮上高さ試験を行った。その結果、浮上開始電流に多少のばらつきがあるものの、ほぼ同じ特性を示すことが確認された。この結果を踏まえ、Fig. 7におけるバルク体の設置場所(相対位置)を決定した。

3.2 複数のバルク体における浮上特性

Fig. 7に示した4種類の試料において着磁電流を10 Aとした時の浮上高さ特性試験を試みた。また、試験では、浮上部の剛性を高めるために、重さ0.091 Nのベーク板を用いてバルク体を固定することにした。この時の浮上部(ベーク板+バルク体4個)の総重量は2.05 Nである。各試料におけるコイル電流と浮上高さの関係をFig. 8に示す。これより、本実験では、同じ浮上高さを実現するコイル電流の大小関係が浮上高さによって少し異なる結果となった。この原因としては、今回の浮上高さの測定では、各バルク体に働く浮上力が異なるためにバルク体を固定したベーク板が傾き、浮上高さの特定が困難であったことが挙げられる。また、試料によって、測定時の液体窒素の液面が異なっていたことも原因の一つとして

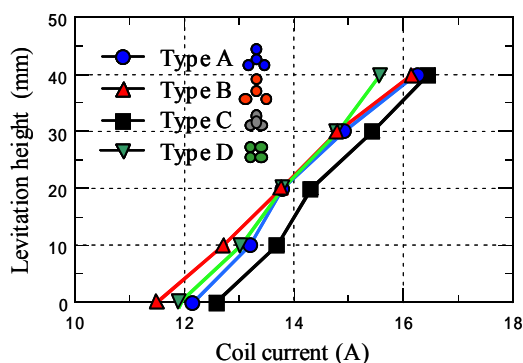


Fig. 8 Levitation height vs. coil current in four types of bulk arrangement.

考えられる。しかし、浮上開始時のコイル電流は、少なくとも液体窒素の液面の高さが同じ状態で測定されていることから、以下ではこの浮上開始時の測定結果に基づいて浮上特性を比較検討することにする。

Type AとBとでは、バルク体間距離が大きいType Bの方が浮上力が大きくなることがわかった。また、Type Cでは、バルク体間の磁束の漏れを抑制し、複数のバルク体の一体性を向上させるために立体的な配置を試みたが、浮上力の改善が見られるどころか、4種類の中では一番低い浮上特性を示す結果となった。浮上安定性に関しては、すべての試料において安定浮上が実現し、非対称磁場中で着磁したバルク体単体の浮上試験で見られたような不安定性は観測されなかった。この原因としては、バルク体単体では、非対称磁場中着磁のため、コイルの半径方向、周方向、または回転方向の不安定性(tilt stability)が生じるのに対し、本実験では、バルク体を対称な位置に配置しベーク板を用いて個々の動きを抑制したため、各バルク体に働く不安定性要因が相殺されたことが考えられる。

3.3 バルク体間距離が異なる場合の浮上特性

3.2の結果より、バルク体数が一定の場合は、バルク体をコイル中心付近に隣接させて配置するよりも、離して配置する方が浮上特性がよくなることがわかった。しかし、複数のバルク体を隣接させて使用する場合など、バルク体間距離が小さい場合は、バルク体同士の相互作用が浮上特性に影響を及ぼすことが考えられる。そこで、まず、Fig. 7の各バルク体配置において、ゼロ磁場中着磁をしたバルク体にコイル磁場を印加した時の、バルク体表面における磁場分布測定を試みた。

3.3.1 バルク体周辺部の磁場分布

複数のバルク体を隣接して配置する場合など、バルク体間の距離が小さい場合は、バルク体周辺部の磁束密度がバルク体単体の場合よりも大きくなることが予想される。そこで、Fig. 7の4種類の試料を用いて、ホール素子による磁場分布測定を試みた。実

験は、外部磁場をゼロにした状態で、ベーク板に固定したバルク体を内径70 mm、外径110 mm、厚さ70 mm、巻線数1760の銅製のソレノイドコイル上に置いて冷却し(ゼロ磁場着磁)、コイルに5 A通電した状態で、コイル表面より27 mm上空(Type Cの中心にあるバルク体表面より1 mm上空)の B_z 分布を測定するという方法で行った。このコイルの発生磁場は、コイル電流5 A時に、コイル中心軸上でかつコイル表面より1 mm上空で65 mTである。測定結果のうち、Type A、C、Dにおける結果をFig. 9に示す。

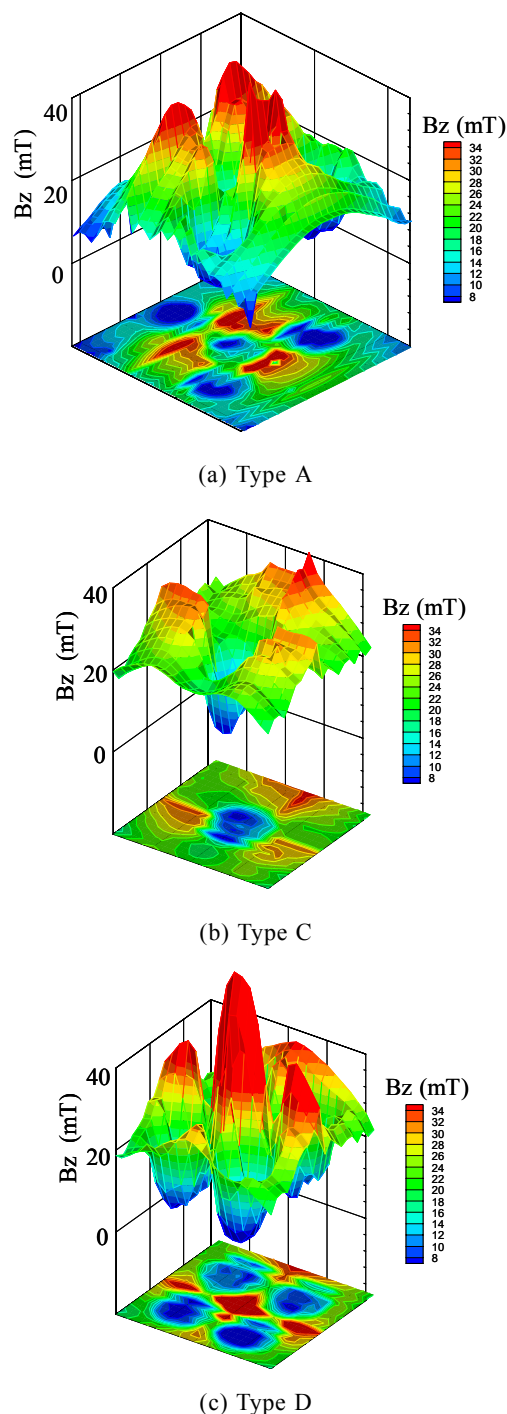


Fig. 9 Magnetic flux density distribution above zero-field-cooled multiple-bulks exposed to a magnetic field generated by an electromagnet.

これより,すべてのTypeにおいて,バルク体が存在している領域では磁束密度が小さくなり,その分バルク体周辺部で大きくなっていることがわかる.また,バルク体周辺部の磁束密度を比較すると,Type C,A,Dの順に大きくなっている.Fig. 8の浮上試験結果においても,浮上開始電流がType C,A,Dの順に小さくなっている(即ち,浮上力が大きくなっている)ことから,バルク体間の相互作用が浮上特性に及ぼす影響という点では,Type CよりもType Aの方が大きく,Type Aの方が隣接させて配置する効果が大きいといえる.また,Type Cでは, No.90,91,93のバルク体間(中央部)の隙間から漏れる磁束をNo.92のバルク体で塞ぐ効果を期待し立体配置を採用したが,今回の試料では,中央部からの磁束の漏れの問題は解消されたものの,浮上特性を改善するまでには至らなかった.

3.3.2 浮上力のバルク体間距離依存性

3.2の浮上試験と3.3.1の磁場分布測定結果より,複数のバルク体を隣接させて配置する場合は,バルク体間の相互作用によって浮上力が大きくなることがわかった.しかし,このバルク体間の相互作用は,バルク体間の距離を大きくしていくにつれて小さくなることが予想される.そこで,着磁電流を10 Aとし,Type Bのバルク体配置においてバルク体間距離を10 mm間隔で変化させた場合について,コイル電流と浮上力との関係を測定することにした.実験は,3.2と同様に,浮上部をロードセルに固定し,コイル電流とロードセルの出力をデジタルスコープで取り込むという方法で行った.また,Type Bにおいて,中心のバルク体(#92)のみの場合(バルク体数:1個)と,中心のバルク体(#92)がない場合(バルク体数:3個)についても同様の測定を行い,中心のバルク体だけの場合と中心のバルク体が無い場合の浮上力の合計と,Type B(バルク体数:4個)の浮上力とを比較することで,バルク体間の相互作用の影響について検討することにした.その結果のうち,コイル電流が10 Aと15 A時の結果をFig. 10に示す.

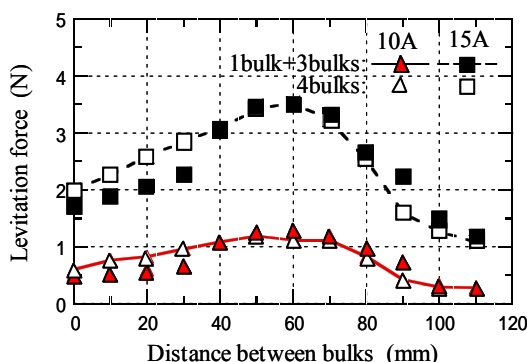


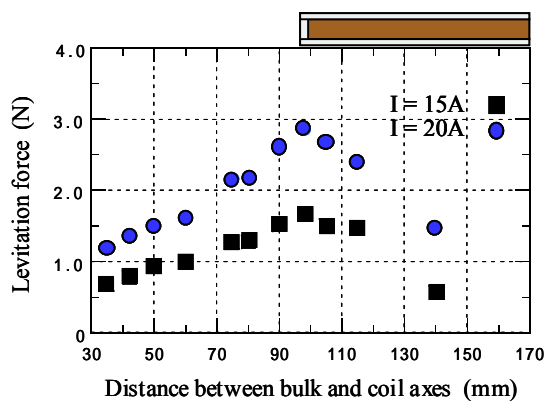
Fig. 10 Influence of interaction between bulks on levitation force as a function of distance between them.

Fig. 10において,白抜きのプロットがType B(バルク体4個)の浮上力,色付きのプロットがバルク体1個とバルク体3個の場合の浮上力の合計を表している.これより,バルク体間距離が40 mm未満では,バルク体1個と3個の場合の浮上力の合計がType Bの浮上力を上回るものの,40 mm以上では両者がほとんど一致する結果となった.これは,本実験に使用した浮上システムでは,バルク体間距離が40 mm以上の場合では,バルク体間の相互作用の影響がほとんどなく,浮上部全体の浮上力を,各バルク体が独立に存在する場合の浮上力の和として求められることを意味している.また,バルク体間の相互作用による浮上力の増加率は,相互作用が無い場合(バルク体1個と3個時の浮上力の合計)の15~30%となった.

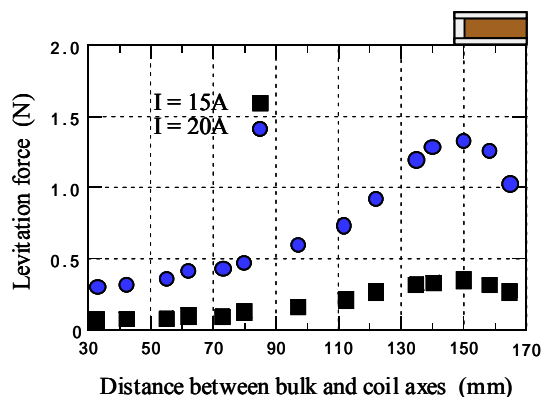
3.3.3 バルク体単体における浮上力の着磁位置依存性

Fig. 10より,バルク体4個の最大浮上力は,バルク体間の相互作用の無い領域(バルク体間距離が60 mm:[中心のバルク体半径15 mm]+[バルク体間距離60 mm]+[周囲のバルク体半径15 mm]=90 mm,すなわちバルク体の中心がコイル内径より10 mm内側)で観測された.バルク体の浮上力は,バルク体が経験するコイルの磁束密度とバルク体内に流れる超電導電流(コイル磁場に依存)との積として近似的に表わすことができるため,浮上力を最大にする最適なバルク体間距離は,バルク体とコイルの相対位置に大きく依存することが予想される.そこで,最大浮上力が得られるバルク体位置とコイル形状との関係を調べるために,大きさの異なる2種類のコイルを用いて浮上力の測定を行った.

実験に使用したコイルは,内径200 mm,外径500 mm,厚さ55 mm,巻線数3486と,内径300 mm,外径530 mm,厚さ78 mm,巻線数3000の銅製のソレノイドコイルである.これらのコイルの発生磁場は,コイル電流が10 Aの時にコイル中心軸上でかつコイル表面より1 mm上空で,それぞれ125 mT,86 mTである.ただし,Fig. 10より,バルク間の相互作用が浮上力に影響を及ぼすのは,バルク間が約40 mm以内(バルク体の中心とコイル中心との距離が約70 mm以下に相当)であることから,バルク間の相互作用を無視できる領域において最大浮上力が得られることが予想される.また,複数のバルク体を用いた浮上力の測定では,着磁時や浮上開始時のバルク体の位置ずれによる測定誤差が生じやすいため,本実験では, Fig. 10の測定誤差の検証を兼ねて,上記の2種類のコイルについて,コイル中心とバルク体中心との距離を変化させた場合のバルク体単体における浮上力



(a) Coil with i.d.=200 mm and o.d.=500 mm



(b) Coil with i.d.=300 mm and o.d.=530 mm

Fig. 11 Most suitable bulk location for levitation force in two types of electromagnets.

測定を試みた。その結果のうち、通電電流15 Aおよび20 A時の浮上力試験結果をFig. 11に示す。Fig. 11の上には、それぞれのコイルの巻線部の位置(内径部付近)を示している。

これより、両コイルにおいて、バルク体の中心がコイル内径上付近にある場合に、浮上力が最大になることが確認された。また、Fig. 10とFig. 11(a)とでは浮上力のピーク位置が10 mm程異なっているが、この原因の1つとしては、4個のバルク体を用いて測定した場合のバルク体の位置ずれなどによる測定誤差が考えられる。

今後は、最大浮上力を与えるバルク体位置とコイル形状の関係の詳細について調べるために、3次元有限要素法による数値解析を用いて、バルク体内の電磁的振る舞いについて検討していく予定である。

4. まとめ

HTSバルク体と電磁石で構成されるアクティブ磁気浮上システムにおいて、効率の良いバルク体浮上

を実現する複数のバルク体の最適配置について検討を行った。その結果、バルク体(単体)をコイル中心より離れた位置で着磁すると、コイル中心で着磁した場合よりも浮上安定性は低下するものの、大きな浮上力を得られることがわかった。また、この結果を踏まえ、複数のバルク体の最適配置について検討したところ、浮上部に働く浮上力が最大となるバルク体間距離はコイルの形状(磁場分布)と密接に関係しており、バルク体がコイルの内径上付近に位置する場合に浮上力が最大となることがわかった。この結果より、コイルの発生磁場分布を考慮することによって、複数のバルク体を組み合わせ使用する場合の最適なバルク体配置を容易に選定できることがわかった。

参考文献

- 1) 中川賀之: 低温工学**34** (1999) 541
- 2) L.K. Kovalev, K.V. Ilushin, S.M.-A. Koneev, K.L. Kovalev, V.T. Penkin, V.N. Poltavets, W. Gawalek, T. Habisreuther, B. Oswald and K.-J. Best: IEEE Trans. Appl. Super. **9** (1999) 1261
- 3) 藤本浩之: 低温工学**34** (1999) 549
- 4) 林浩幹, 植田浩史, 石山敦士, 津田 理: 電気学会研究会資料 **ASC-01-29** (2001)
- 5) 寺西康幸, 真川康弘, 植田浩史, 石山敦士, 津田 理: 電気学会研究会資料 **ASC-01-30** (2001)
- 6) 津田 理, 田村正博, 原田直幸, 浜島高太郎: 第65回低温工学・超電導学会講演概要集 **D1-18** (2001) 81
- 7) H. Lee, M. Tsuda and Y. Iwasa: Cryogenics **38** (1998) 419
- 8) M. Tsuda, H. Lee, S. Noguchi and Y. Iwasa: Cryogenics **39** (1999) 893
- 9) Y. Iwasa and H. Lee: Cryogenics **37** (1997) 807
- 10) M. Sawamura, M. Morita and H. Hirano: Physica C (2002)
- 11) K. Iida, J. Yoshioka, N. Sakai and M. Murakami: Physica C **370** (2002) 53
- 12) 西健太郎, 館 泰治, 沢孝一郎, 岩佐幸和, 長嶋賢, 藤本裕之, 宮本 毅, 富田 優, 村上雅人: 低温工学 **34** (1999) 640
- 13) Y. Iwasa, H. Lee, M. Tsuda, M. Murakami, T. Miyamoto, K. Sawa, K. Nishi, H. Fujimoto and K. Nagashima: IEEE Trans. Appl. Super. **9** (1999) 984

(平成14年12月27日 受理)