

# GdBCO 超電導バルク体と高磁場勾配超電導マグネットによる、 浮上力の実験的・解析的評価

## Practical Evaluation of Levitation Force between GdBCO Bulk Superconductors and Superconducting Magnet with a High Magnetic Field Gradient

80715171 荒木聡史 (Satoshi Araki) Supervisor 村上俊之 (Toshiyuki Murakami)

### 1 序論

高温超電導体は様々な応用への可能性を秘めており、その一つとして超電導フライホイール電力貯蔵装置がある。軸受に超電導バルク体を用いることで、磁気浮上により非接触で損失のないフライホイールの実現が期待されている。大きな電力を貯蔵するためには、フライホイールの回転体の構造を大きくすることが重要であり、これには回転体を支える浮上力の向上が大切である。

本研究では、磁気浮上の現象解明とその予測を目指し、以下のような実験・解析を行い、その結果について評価・検討を行った。

(1) 新しく導入された超電導マグネットを用いて、様々な条件下での実験

(2) MATHEMATICA を用いた、簡単なモデル化による浮上力解析

(3) ELF/MAGIC を用いた、3次元モデルによる浮上力解析  
本論文ではこれらの結果のうち、GdBCO 超電導バルク体 (φ60mm) と超電導マグネットの間に働く浮上力について、(1) で得られた実験データに基づき、3次元解析ソフトである ELF/MAGIC を用いて、現象解明と予測を試みた (3) の結果について述べる。

### 2 シミュレーション上における浮上力導出方法

本研究で用いたシミュレーションソフト上で導入されている浮上力の計算方法は、マクスウェルの応力法である。マクスウェルの応力法は (1) 式で与えられる。

$$F = \oint_S \mathbf{T} \cdot \mathbf{n} dS$$

$$= \oint_S \frac{1}{\mu_0} \left\{ \begin{array}{l} (B_x^2 - \frac{1}{2} B^2) n_x + (B_x B_y) n_y + (B_x B_z) n_z \\ (B_y B_x) n_x + (B_y^2 - \frac{1}{2} B^2) n_y + (B_y B_z) n_z \\ (B_z B_x) n_x + (B_z B_y) n_y + (B_z^2 - \frac{1}{2} B^2) n_z \end{array} \right\} dS \quad (1)$$

これより、浮上力は磁束密度の2乗に比例することがわかる。よって、本シミュレーションにおいて浮上力を定量的に考える際には、磁束密度に着目し、考察していくこととする。

### 3 シミュレーション条件

今回の解析では、Femap を用いて解析モデルを作成した。解析モデルは実際の実験装置と同じ寸法であり、超電導バルク体

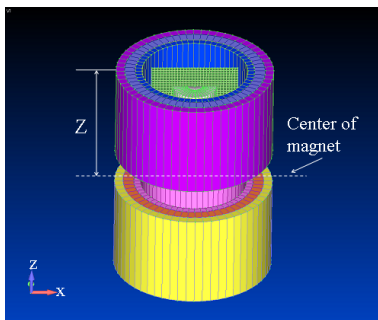


図 1: シミュレーションモデル全体図

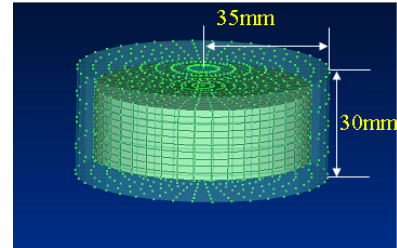


図 2: 超電導バルク体モデル

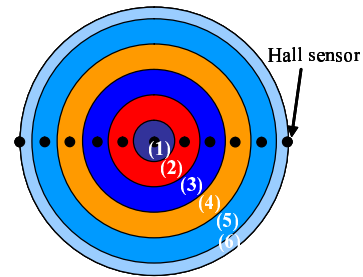


図 3: バルク体表面の境界条件層

は円形コイル内部に配置されている。モデル全体図を図 1 に、超電導バルク体モデルを図 2 に示す。バルク体モデルの周りには、これは応力評価面であり、これにより浮上力を導出している。さらに、実験結果に基づき作成したバルク体表面モデルを図 3 に示す。このモデルはバルク体表面を通過する磁場の境界条件を、同心円状に設定できるように作成したものである。各層は、実験において配置したホール素子 2 つの間を通るように形成されている。それぞれの間隔は (1), (6) が 3mm, その他は 6mm である。シミュレーション時に設定した境界条件は表 1 にまとめた。1 はホール素子による実測値を代入した場合であり、2 は磁場分布が実測値に近づくように境界条件を調整した場合である。シミュレーションは、実験の中で基礎となるバルク体の位置である、 $z=120\text{mm}$  にある状態で行った。基礎位置で浮上力を予測するモデルができれば、他の位置においても応用できると考えたためである。

表 1: シミュレーション条件 (磁場の境界条件)

	1: Experimental data [T]	2: Adjusted [T]
(1)	1.24	0.55
(2)	1.40	0.95
(3)	1.68	1.44
(4)	2.03	1.75
(5)	2.44	2.24
(6)	2.72	2.435

表 2: 浮上力シミュレーション結果

	シミュレーション条件	浮上力 [N]
1	Experimental data	562.22
2	Adjusted	918.04

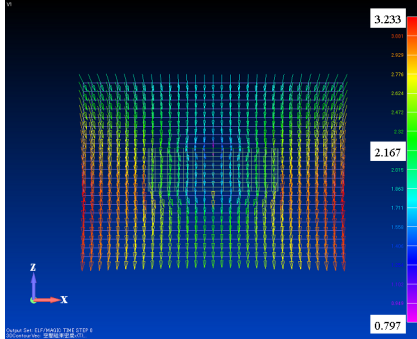


図 4: 垂直評価面によるシミュレーション結果 (1)

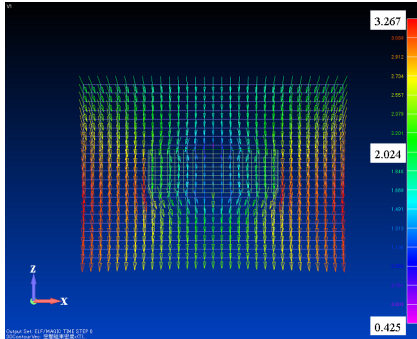


図 5: 垂直評価面によるシミュレーション結果 (2)

#### 4 シミュレーション結果及び考察

##### 4.1 同心円モデルにおける浮上力シミュレーション

各条件での浮上力結果を表 2 に示す。これによると、2 の条件の時、浮上力の計算値は、実測値 (909.34N) に非常に近いことがわかる。それに対し、1 の浮上力は実測値と比較してもかなり小さいという結果となった。なぜこのような結果になったのか検討するため、それぞれの条件において、垂直評価面による検討を行った。

垂直評価面によるシミュレーション結果を図 4, 図 5 に示す。これより、異なる強さの磁場がバルク体内を通過している様子が見て取れる。また、実験結果とシミュレーションにおけるバルク体下方 2mm の評価点位置における磁場を抜き出し比較したものを図 6 に示す。図 6 より、実験と同じ浮上力を得られた 2 のほうが、実測値により近い値になっていることがわかる。同時に、バルク体の中心付近で値が大きく異なっていることがわかる。そこで、この中心付近の違いが浮上力の相違に関係しているのではないかと考え、定量的に考察を行った。なお、中心付近で磁束密度が実験とシミュレーションで大きく異なっているのは、計算が発散しないように、中心部に非常に小さな穴を空けているためである。

先にも述べたが、シミュレーションで与えた各条件は通過する磁場の値である。つまり、値が大きいかほど浮上力に影響を与える磁束密度が小さくなるため、その分浮上力も小さくなっていると考えられる。そこで、実際にどの程度の磁場を遮蔽しているのかを計算し、その差を 2 乗して比較を行った。

その結果、 $r=4\text{mm}$  においては、1: 0.9113, 2: 1.836 となった。さらに、 $r=8\text{mm}$  においては、1: 0.9473, 2: 1.743 となった。それぞれを比較すると、 $r=4\text{mm}$  では 2 が約 2.01 倍遮蔽し、 $r=8\text{mm}$  では約 1.84 倍遮蔽していることになる。2 の浮上力 909.34N は 1 の浮上力 562.22N の約 1.63 倍であった。よって、この中心付近の磁場遮蔽量の違いが浮上力の違いに現れた

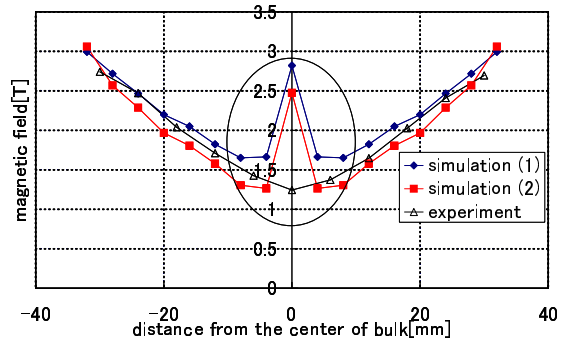


図 6: 実測値とシミュレーション結果の磁場データ比較

表 3: 各境界層を変化させた時の浮上力変化量

	浮上力変化量 [N]
(1)	0.77
(2)	6.21
(3)	11.82
(4)	16.67
(5)	20.03
(6)	10.2

と考えることができ、この浮上力の違いはある程度妥当であると言える。厳密には、他の位置における磁場の違いも影響しているため、全体をより詳しく考察すると、1.63 倍に近づくと考えられる。

これらの検討より、シミュレーション上で浮上力が異なる主な要因は、磁束密度の量であることがわかる。また、磁場分布の微妙な違いが浮上力に大きな影響を与えることもわかる。よって、シミュレーションで浮上力を求める時は、正確な磁場分布が必要であり、またシミュレーション上でそれに近い磁場分布を実現することが大切であることがわかった。

さらに、本論文で作成したモデルにより行ったシミュレーションは、浮上力が実験値とわずか 1% 程度しか異なっていないことから、同心円状の境界層を持つモデルは浮上力を予測するモデルとして非常に有効であることがわかった。

##### 4.2 シミュレーションにおける浮上力の定量的評価

磁場の侵入量の違いによって、浮上力が異なることについては前パートで示した。しかし、浮上力に対してどの部分の侵入量が最も影響を与えるかといった具体的な考察は行っていない。そこで本パートでは、今回作成した同心円状モデルについて、磁場分布が浮上力に与える影響について、定量的な評価を行う。変化量はどの境界面においても 0.05T とし、中心部、外円部を別々に比較した。シミュレーションにより得られた、各境界層の磁束密度変化による浮上力への変化量をまとめたものを表 3 に示す。

#### 5 結論

本研究では GdBCO 超電導バルク体 ( $\phi 60\text{mm}$ ) と超電導マグネットの間に働く浮上力について、実験データに基づき、シミュレーションを行い、検討を行った。結果、浮上力の違いは中心付近の磁束密度の違いによるものであることがわかった。また、今回作成した同心円状に境界条件を設定することができるモデルは、浮上力を予測するモデルとして、非常に有効であることがわかった。

#### 参考文献

- [1] M.Tsushima, K.Murata, M.Iori, and Y.Itoh: " Numerical Evaluation of Maximum Stress of a Bulk Superconductor in Partial Magnetization ", *IEEE Trans., Appl., Supercond.*, Vol.14, No.2, pp.1122-1125, Jun. 2004