

シミュレーションを用いた形状の異なる超電導リングバルクのパルス着磁特性

藤代・内藤研究室 s0416010 大久保敬汰

1. Introduction

超電導バルクとは超電導転移温度 T_c 以下において電気抵抗がゼロとなる性質を持ち、電磁誘導を利用して着磁することが可能である。また、永久磁石の 10 倍以上の磁場を持つ疑似永久磁石として応用されている。更に、REBaCuO 超電導バルクが高い T_c 、捕捉磁場 B_t を持つと知られている。現在、基礎研究や応用で数多く用いられているバルクはディスク型バルクである。一方でリング型バルクは中心部の磁場が利用可能であることから、従来の巻き線型超電導の代替として注目されており、NMR など数多くの応用例がある。よって、ディスク型だけでなくリング型バルクにおいてもより詳細な着磁特性の解明が重要である。

超電導バルクの着磁方法としては磁場中冷却着磁法(FCM : Field Cooled Magnetization)や、パルス着磁法(PFM : Pulsed Field Magnetization)などがある。最も用いられている着磁法である FCM は T_c 以上の温度で静磁場を印加し、その後 T_c 以下へと冷却し磁束を捕捉させる方法である。現在、REBaCuO 超電導バルクにおいて 26 K で 17.6 T の捕捉磁場が記録されている[1]。メリットとしては、バルクが持つ最大の捕捉磁場ポテンシャルを引き出す事が可能である事、デメリットとしては、装置が大型、着磁時間が長い事が挙げられる。一方で PFM は初めに T_c 以下に冷却した後、パルス磁場を印加し磁束を捕捉させる方法である。現在、捕捉磁場は REBaCuO 超電導バルクにおいて 28 K で 5.2 T を記録している[2]。このことから、FCM の捕捉磁場に対する PFM の捕捉磁場から算出される捕捉率は低く、バルクが持つ最大の捕捉磁場ポテンシャルを引き出せていらない事が問題となっている。しかし、装置が小型で着磁時間が短いというメリットから、応用に適していると考えられている。よって本研究では数値シミュレーションを用いて複数のバルク形状で PFM をを行い、磁束運動及び発熱に与える影響を明らかにし、捕捉率がより高いバルク形状の模索を目的とする。

2. Experimental

表 1 に各バルクの名称及び寸法を示す。REBaCuO 超電導バルクとして表 1 のような形状の 3 種の数値モデルを作成した。着磁装置は超電導バルクに対して、ソレノイドコイル(内径 50 mm、外径 60 mm、高さ 50 mm)を用いて、着磁温度 $T_s = 65$ K、 $B_{ex} = 1.0 \sim 5.0$ T で立ち上がり時間 13 ms のパルス着磁を行った。着磁中のバルクは底面から冷却され、着磁後 120 s までの磁場及び温度を算出した。着磁シミュレーションには PHOTO-EDDY、THERMO を用いた。捕捉磁場の計測部位は Disc 型バルクでは上面、Ring 型バルクは中心とした、温度の測定部位は全てのバルクにおいて外周上面である。

3. Results and discussion

図 1 に各バルクでの各外部磁場における捕捉磁場の時間依存性を示す。上段の磁束の侵入過程より、Disc の磁束侵入量は最大約 4 T、Ring(ID10)の磁束侵入量は最大約 5 T であった。次に下段の流出過程より、Disc の磁束流出量は最大約 3 T、Ring(ID10)の磁束流出量は最大 5 T 以上となった。このことから、内径の増大に伴い、磁束の侵入量及び流出量も増加することが数値シミュレーションより明らかとなった。

図 2 に $B_{ex} = 4.0$ T における各バルク内部の磁場分布(B_y)を示す。図より磁束侵入の初期段階である 6 ms では Disc、Ring(ID5)では中心部の B_y が約 1 T 以下と小さいままであった。15 ms では全てのバルクで中心部の B_y が増加していたが、依然として Ring(ID10)が約 3.5 T と最も高い B_y を示した。次に磁束流出の初期段階である 60 ms では Disc の中心部の B_y が約 2 T と高く Ring(ID10)の B_y が約 1 T と小さくなっていた。更に 120 s においては Disc、Ring(ID5)は中心部の B_y が約 1 T 付近、Ring(ID10)では約 0.5 T となった。このことから磁束はバルク外周から侵入し、外周から流出すること、内径の増大に伴い、侵入量及び流出量は増大することが分かった。

表 1 各バルクの名称及び寸法

	内径ID(mm)	外径OD(mm)	高さH(mm)
Disc	0		
Ring(ID5)	5	15	15
Ring(ID10)	10		

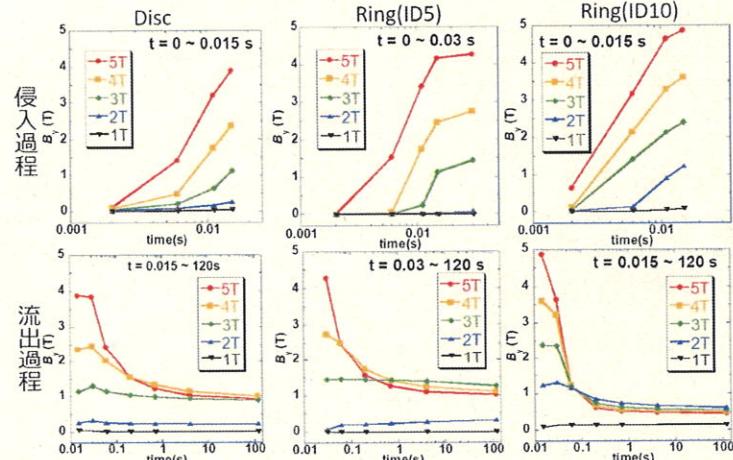


図 1 PFM における捕捉磁場の時間依存性

図3に $B_{ex} = 4.0$ Tにおける温度変化の時間依存性を示す。図より、Ring(ID5)はDiscより最大0.5 K程上昇、温度が減少を始める時間も同時刻であった。一方、Ring(ID10)はDiscより最大2 K程上昇した後、72 K以上で停滞し、2 s程遅れて温度が減少した。この温度上昇はバルクの体積の違いの影響もあるが、主に冷却面の面積が減少し、上面までの冷却が不十分となった為であると考えられる。

図4にFCMにおける捕捉磁場の外部磁場依存性を示す。図よりどの外部磁場においても、内径の増大に伴い捕捉磁場は低下した。また、各バルクの持つ捕捉磁場の最大ポテンシャルはDisc、Ring(ID5)では1.7 T付近、Ring(ID10)では約0.8 Tであることが数値シミュレーションより明らかとなった。

図5にPFMにおける捕捉磁場の外部磁場依存性を示す。 $B_{ex} = 1 \sim 2$ Tの低外部磁場においては内径の増大に伴い捕捉磁場も増加しており、Ring(ID10)は最大約0.5 Tを記録した。また、 $B_{ex} = 3 \sim 5$ Tの高外部磁場ではRing(ID5)が捕捉磁場が最大約1.75 Tと最も高く、次にDisc、Ring(ID10)という結果となった。

図6に捕捉率の外部磁場依存性を示す。捕捉率は B_y^{PFM} を B_y^{FC} で割ることによって算出した。捕捉率が100%に近く程バルクが持つ最大捕捉磁場ポテンシャルを引き出しているといえる。図より、どの外部磁場においてもリング型がディスク型より捕捉率が高い結果となった。 $B_{ex} = 1 \sim 2$ Tの低外部磁場においてはDisc、Ring(ID5)が捕捉率20%以下と小さい値であるのに対し、Ring(ID10)では最大70%程度と非常に高くなっていた。 $B_{ex} = 3 \sim 5$ Tの高外部磁場においては、Discに対してRing(ID10)は捕捉率が同等か10%程度向上しており、Ring(ID5)は最大約30%捕捉率が向上した。以上のことから、バルク形状が変化するとPFMとFCでの捕捉磁場も変化し、捕捉率はリング型がより大きくなることが明らかとなった。要因としてはバルク形状がPFMでの磁束運動に影響を与える為であると考えられる。

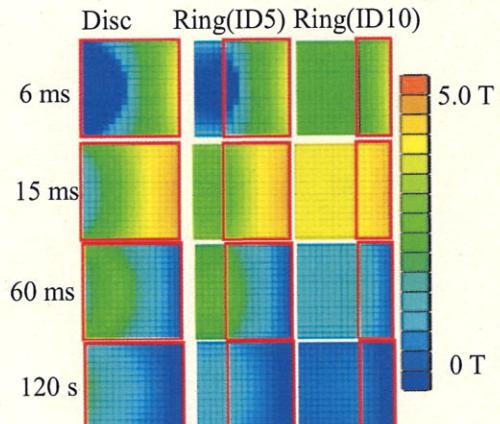
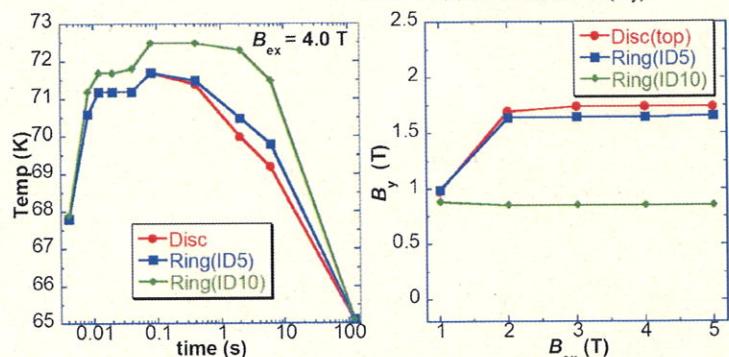
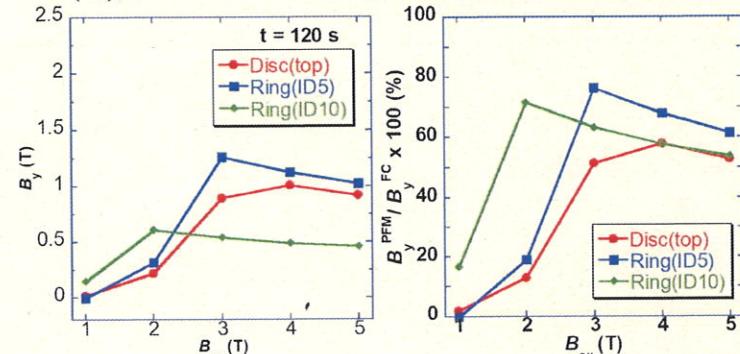


図2 PFM での $B_{ex} = 4.0$ T におけるバルク内部の磁場分布(B_y)



(左)図3 PFM での $B_{ex} = 4.0$ T における温度の時間依存性

(右)図4 FCM における捕捉磁場の外部磁場依存性



(左)図5 PFM における捕捉磁場の外部磁場依存性

(右)図6 捕捉率の外部磁場依存性

4. Conclusion

PFMにおいて、バルク形状の違いは磁束運動の振る舞いに現れ、リング型にすることで磁束侵入量及び流出量が増加した。また、外部磁場とバルク形状の組み合わせによってはディスク型よりも高い捕捉磁場となり、捕捉率も大きく向上した。よって、本研究ではバルク形状をリング型へと変更し、捕捉率を高める事によって、バルクの持つ最大の捕捉磁場ポテンシャルを引き出す事が可能であることが明らかとなった。

5. References

- [1] J. H. Durrell et al., "A trapped field of 17.6 T in melt-processed, bulk Gd-Ba-Cu-O reinforced with shrink-fit steel," Supercond. Sci. Technol., vol. 27, no. 8, 2014, Art. no. 082001.
- [2] H. Fujishiro, et al.: "Higher trapped field over 5 T on HTSC bulk by modified pulse field magnetizing", Physica C 445-448 (2006) 334-338.