

パルス磁場印加における超伝導バルク中の磁束の運動と捕捉特性

材料物性工学専攻 藤代研究室 日山 拓也

1. 序論

バルク超伝導体の応用の 1 つである超伝導バルク磁石を実現するための着磁法として、パルス磁場着磁(PFM)が盛んに研究されている。PFM は磁場中冷却着磁(FCM)と比べ、発熱が大きいため捕捉磁場 B_T が小さい。これまでに研究室では発熱を抑制し B_T の向上に効果的な着磁法として、二段階の着磁法である Modified Multi-Pulse technique with Stepwise Cooling (MMPSC)法を提案した。バルクにホールセンサを半径方向に複数枚貼り付け、局所磁場 B_L を測定した結果、第一段階で M 字型に磁場を捕捉させた場合、第二段階での B_T が向上することがわかった。この着磁法を Gd 系超伝導バルクに適用して $B_T=5.2T$ 、Sm 系超伝導バルクに適用して $B_T=4.3T$ を達成し、さまざまなバルクに対して有効であることを確かめた。しかしこれまでの実験では、M 字型の捕捉磁場の最適化とその理解についての課題が残された。そこで本研究では、MMPSC 法の第一段階での M 字型の捕捉磁場分布の形状が、第二段階での磁場の捕捉に与える影響をバルク表面の二次元磁場分布を調べることで検討した。

2. 実験方法

実験には直径 46mm、厚さ 18mm の GdBaCuO 系バルクを使用し、冷凍機を用いて伝導冷却した。MMPSC 法は Fig.1 (a)に示すパターンで行った。すなわち、第一段階ではバルクの初期温度 $T_S(1)$ 、印加磁場 $B_{ex}(1)$ を $T_S(1)=70K$ 、 $B_{ex}(1)=2.7\sim 3.9T$ 、第二段階ではバルクの初期温度 $T_S(2)$ 、印加磁場 $B_{ex}(2)$ を $T_S(2)=30\sim 50K$ 、 $B_{ex}(2)=5.1\sim 6.3T$ の条件で行った。着磁後に真空中でホールセンサをバルク表面から 0.5mm 上部を走査させ、捕捉磁場分布を測定した。その後、局所での磁束運動を測定するために Fig.2 の挿入図に示す位置に Hall sensor を貼り付け同条件でパルス着磁を行った。

3. 実験結果と考察

3-1 第一段階での M 字型分布の影響

Fig.1(c)~(e)に MMPSC 法の各段階での二次元の捕捉磁場分布図、および捕捉磁場分布図の中心軸上での断面図を示す。各条件では第一段階である No.1、No.2 pulse のバルク初期温度を $T_S(1)=70K$ とした。(c)では $B_{ex}(1)=2.7T$ 、(d)では $B_{ex}(1)=3.9T$ 、(e)では $B_{ex}(1)=3.3T$ のパルス磁場をそれぞれ印加した。第二段階である No.3、No.4 pulse では(b),(c)は $T_S(2)=50K$ 、 $B_{ex}(2)=6.3T$ とした。(d)は $T_S(2)=30K$ 、 $B_{ex}(2)=6.3T$ の条件でパルス着磁を行った。

(c)に示すような、No.2 pulse 印加後に M 字型の中心に磁場がほとんど捕捉されない場合では、最終的な中心での捕捉磁場は $B_T(C)=2.28T$ だった。これは同一強度のパルスを印加する場合(SPA)での最大捕捉磁場 $B_{MAX}(C)=2.33T$ 、($T_S=50K$ 、 $B_{ex}=6.2T$)とほぼ同じ値だった。(b)に示す捕捉磁場分布図を見ても大きな差異はなかった。

これに対し(d)に示すように No.2 pulse 印加後に M 字型の中心部の B_T が高い場合は、周辺部のみで B_T が

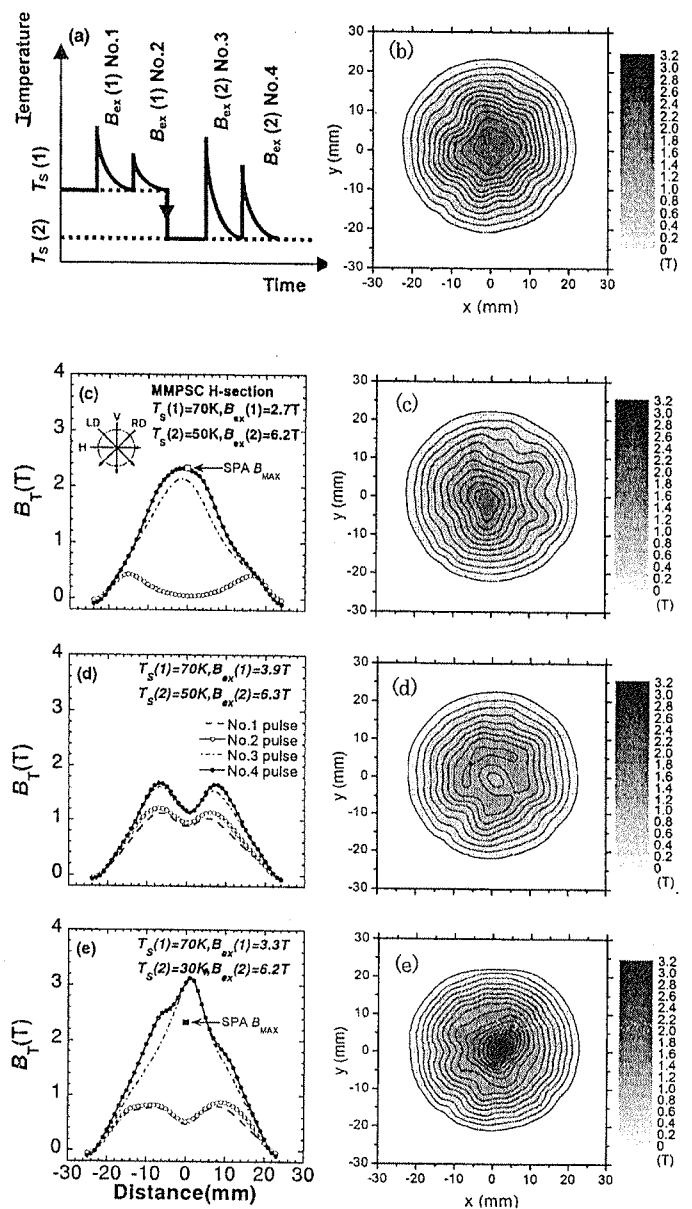


Fig.1 (a)MMPSC 法の概念図 (b)SPA での捕捉磁場分布図 (c)~(e)MMPSC 法での捕捉磁場分布図(右図)捕捉磁場分布の断面図(左図) (e)最適な M 字型分布

向上し最終的な $B_T(C)$ は向上せず $B_T(C)=1.20T$ だった。捕捉磁場分布を見ると、M字型分布の形状はほとんど変わらず、捕捉磁場の絶対値が大きくなっていることがわかる。

(e)に示す条件では、M字型の形状を(c)、(d)の中間の形状とした。また、第二段階でのバルクの初期温度 $T_S(2)$ を最適化することでピンニング力を増大させ捕捉磁場の増大を目指した。その結果、これまでの条件とは違い同心円状の捕捉磁場分布を得ることができ、SPAでの $B_{MAX}(C)=2.33T$ より約 34% 捕捉磁場を向上し、 $B_T(C)=3.13T$ 達成することができた。

3-2 PFM 中の磁束運動

これまでには捕捉磁場分布の測定から捕捉磁場の向上について検討してきた。ここでは捕捉磁場分布の形状から局所磁場測定的位置を定め測定を行った。

Fig.2 に印加磁場、局所磁場の時間依存性を示す。上図に SPA の $T_S=50K$ 、 $B_{ex}=5.1T$ 、No.1 pulse での結果を示す。下図に MMPSC 法の $T_S=50K$ 、 $B_{ex}=5.1T$ 、No.3 pulse での結果を示す。

SPA での結果が示すように、 $T_S=50K$ 、 $B_{ex}=5.1T$ ではバルクの周辺部である、 $B_T\#1$ $B_T\#3$ では磁束が大きく侵入した。しかし、バルク中心である $B_T\#2$ には最大で 2T までしか磁束が侵入していない。これは、バルクのピンニング力が強く $B_{ex}=5.1T$ の磁場強度ではポテンシャルバリアを完全に破れていないためである。最終的にバルク中心での捕捉磁場は $B_T\#2=1.2T$ だった。

MMPSC 法での結果が示すように、 $B_T\#1$ $B_T\#3$ では SPA の場合と同様に磁束が大きく侵入した。しかしバルク中心では最大 3.5T まで磁束が侵入することができ、最終的な捕捉磁場は $B_T\#2=2.8T$ だった。この現象は第二段階の初期温度を変化させピンニング力を増大させても同様の結果が得られた。すなわち、第一段階で M字型分布を形成することでバルク中心部へ磁束が侵入しやすくなることがわかる。

Fig.3、Fig.4 に SPA、MMPSC 法それぞれのバルク中心軸上での局所磁場の時間依存性をそれぞれ示す。Fig.3 に示すように、SPA では最大印加磁場が発生する 13ms までに磁束の侵入はほとんど完了していることがわかる。それに対し、MMPSC 法を適用した場合、バルク中心での磁束の侵入は SPA と比べピークが遅くなることわかる。

これまで考えられてきた M字型分布による捕捉磁場の向上は、バルク中心での磁束の速度が遅くなるのが要因であると考えられる。捕捉磁場を低下させる要因である発熱は、粘性損失、ピンニング損失が原因である。それぞれ磁束の速度に依存するため、損失が共に軽減され、発熱の抑制が起こり、捕捉磁場が向上していると考えられる。

4.まとめ

本研究では MMPSC 法の第一段階での M字型分布の有効性についての実験的検討を行った。

M字型分布の形状の最適化、パルス磁場強度、バルクの初期温度の着磁条件の最適化を行うことで SPA での $B_{MAX}(C)=2.33T$ より約 34% 捕捉磁場を向上させることができ、 $B_T(C)=3.13T$ を得ることができた。また、磁束運動を測定することで、M字型分布をあらかじめ形成することがバルク中心部へ磁束を侵入させやすくすることがわかった。そして、磁束の速度を遅くさせることで捕捉磁場低下の要因である発熱を抑えることが可能となり、捕捉磁場を向上させることができた。

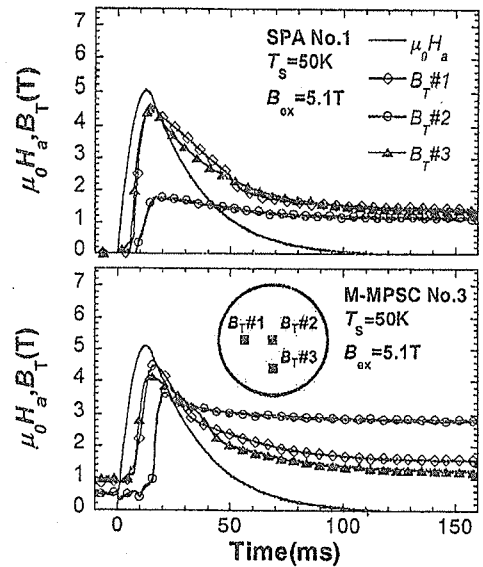


Fig.2 印加磁場、局所磁場の時間依存性

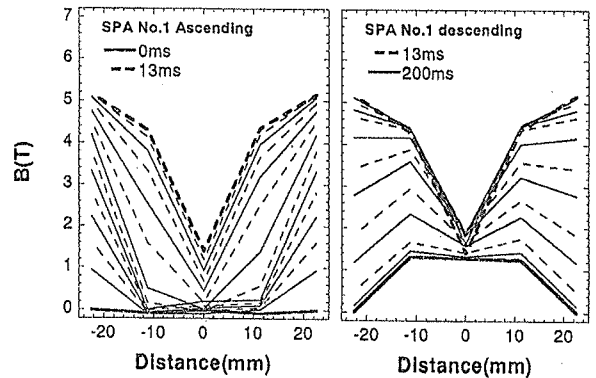


Fig.3 SPA No.1 pulse のバルク中心軸上の局所磁場の時間依存性

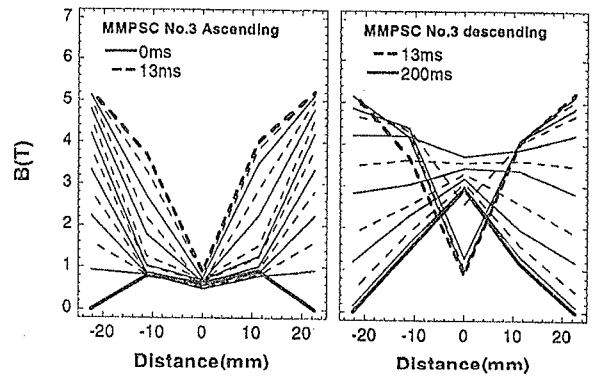


Fig.4 MMPSC 法 No.3 pulse のバルク中心軸上の局所磁場の時間依存性