

1. 序論

バルク超伝導体の着磁方法としてパルス着磁法 (PFM)、磁場中冷却着磁法 (FCM)、ゼロ磁場冷却着磁法 (ZFC) がある。FCM は高い捕捉磁場を得られるが、超伝導マグネットを用いるため着磁装置が大型化し、高価である。ZFC は FCM と同じ捕捉磁場を実現するためには、原理的に FCM の 2 倍の印加磁場を必要とする欠点がある。PFM は銅コイル等を用いるため超伝導マグネットを用いず、着磁装置がコンパクトで安価であるが、捕捉磁場が FCM より少ないという欠点があった。そこで、一定温度でほとんど同じ大きさの外部磁場を複数回印加する SPA 法や、温度ステージが 2 段階ある MMPSC 法を用いて捕捉磁場を向上しようとする研究が行なわれている。本研究では同一バルクを用いて FCM、ZFC、PFM の着磁方法の違いによる捕捉磁場分布を比較し、その違いをピンモデルを用いて考察することを目的とする。

2. 実験の詳細

超電導工学研究所 (ISTEC) で作製された高い特性を有する GdBaCuO バルク超伝導体を使用した。直径 45mm、厚さ 24.5mm の sampleB、直径 36mm、厚さ 20.0mm の sampleC を使用した。77K での $B_T(FC)$ はそれぞれ 2.08T、1.79T である。中心にホールセンサーを設置し捕捉磁場を計測した。端にセルノックス抵抗温度計を設置し、温度を計測した。初期温度 $T_s=33\sim 88K$ 、印加磁場 $B_{ex}=3T$ で、超伝導マグネットを用いて FCM、ZFC を行なった。また、バルク表面より 4mm 上部をホールセンサーを走査させ、捕捉磁場分布を測定した。FCM、ZFC の実験は、4 年の古田君、院生の欠端、三浦氏と共同で実験した。これらの結果をこれまで研究室で行ったパルス着磁の温度と印加磁場の結果と比較した。パルス着磁法は SPA 法を行い、それぞれの温度で $B_{ex}=4.1T$ を 3 回印加した。

3. 実験結果

図 1、図 2 に、sampleB と sampleC での FCM と ZFC の総磁束量 Φ_T と、中心での捕捉磁場 B_T^c の温度依存性を比較した結果を示す。FCM と ZFC を比較すると総磁束量では、低温化するにつれて FCM のほうが増加し、半径が大きいほうが総磁束量が増加する結果となった。これは、 T_s が低いほどバルク全体のピンニング力が強くなり、磁束がバルク全体から侵入しにくくなるためである。FCM は磁束を侵入させてから温度を下げるので、低温化していくと磁束をよく捕捉できる。また、ZFC は温度を下げてから磁束を浸入させるので低温化させていくと、ピンニング力の影響により中心にほとんど磁束が侵入されていない周辺部のみ着磁された M 字型分布を得るので総磁束量が少なくなると考えられる。中心の捕捉磁場は 80K 付近で

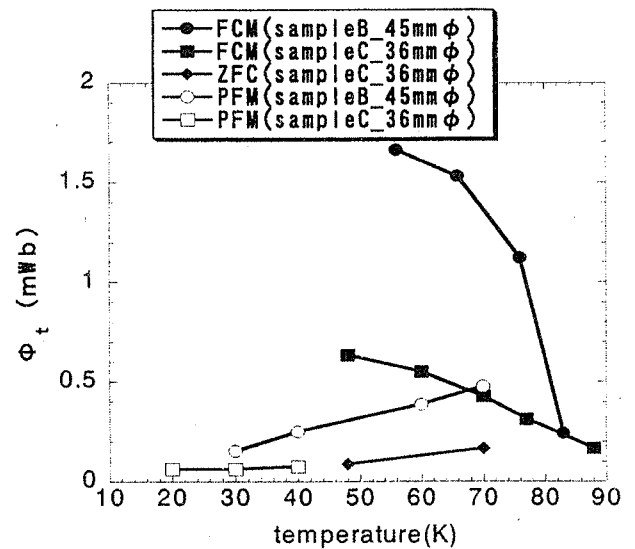


図 1 温度と総磁束量の依存性

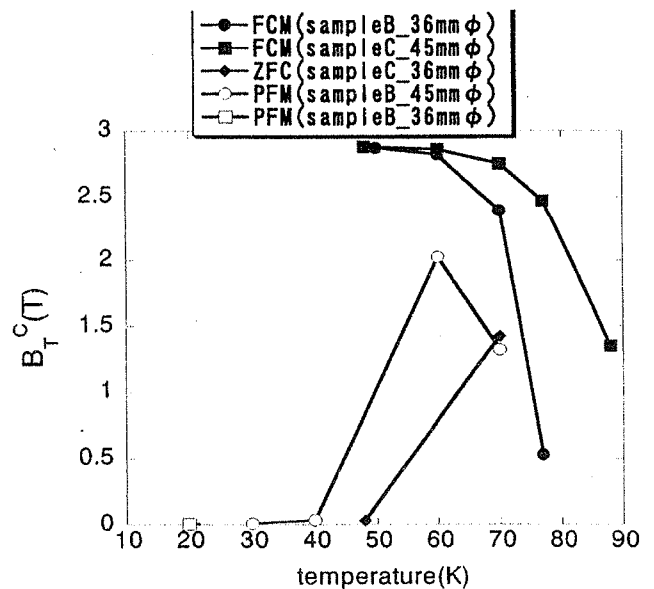


図 2 FCM 捕捉磁場分布の断面図

は sampleC のほうが大きく、50K 付近ではほぼ同じ値となった。半径の違うバルクを臨界状態モデルの一つである Bean モデルを用いて説明すると、臨界電流密度 (J_c) に比例した角度の磁場傾斜となるので、低温化によりピンニング力が強くなると J_c も大きくなるので傾きも大きくなるため、半径が大きいほうが捕捉磁場は大きくなると予測される。次にパルス着磁との比較を行なう。条件は 30K、40K、60K、70K で $B_{ex}=4.1T$ を 3 回印加した。院生の三浦氏が行なった。図 3、図 4 に sampleB の FCM と PFM の 4mm 上の捕捉磁場分布の断面図の結果を示す。FCM の捕捉磁場分布は 4mm 上で同心円状になっているのに対して、PFM は磁束の侵入は均一でなかった。これは FCM では最初に磁場が均等に侵入してくるのに対して PFM ではパルスの立ち上がり時間が数 10ms なので磁束の侵入しやすい領域から侵入してくるためと思われる。図 5 に Bean モデルを用いて FCM、ZFC、PFM の違いを説明した図を示す。徐々に印加磁場をバルクに与えていくと、バルク内には磁束が侵入していく。このとき大型バルクと小型バルクにおいて同じ臨界電流密度をもっているとすると、Bean モデルにおいて磁束はその臨界電流密度に比例した角度の磁場傾斜となるので、どちらのバルクでも同じ角度で侵入していく。ZFC を比較してみると印加磁場が最高値を取ったとき、小型バルクでは中心部に十分に磁束が侵入しているが、大型バルクでは中心部に磁束が侵入しにくいことがわかる。最終的な捕捉磁場を比べると、小型ではきれいなコーン状であるのに対し大型バルクでは中心部がへこんだ M 字型の捕捉磁場が得られる。また、PFM ではバルク内の発熱が生じ臨界電流密度が低くなり磁場傾斜の角度も低くなるので捕捉磁場はより小さくなる。

4. 結論

低温になるにつれて FCM では捕捉磁場は向上したが、ZFC ではピンニング力が強くなるため、向上しなかった。FCM では大型バルクのほうが小型バルクより捕捉磁場が大きかったが、PFM では大型バルクのほうが小型バルクより発熱量が大きくなり磁場勾配が低くなる。

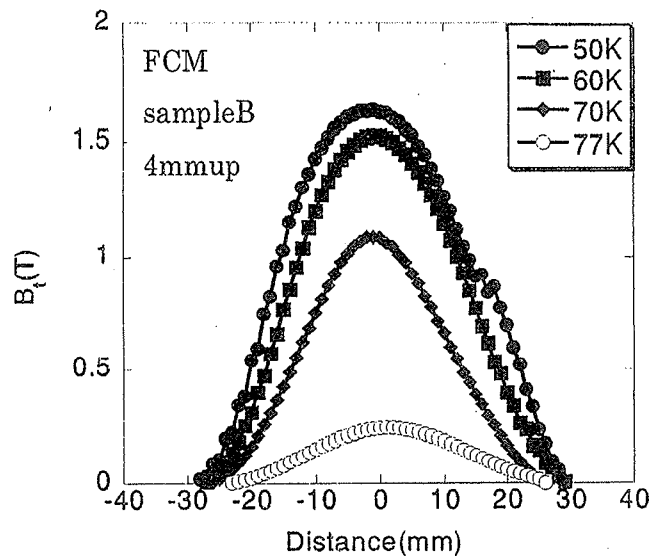


図 3 FCM の捕捉磁場分布の断面

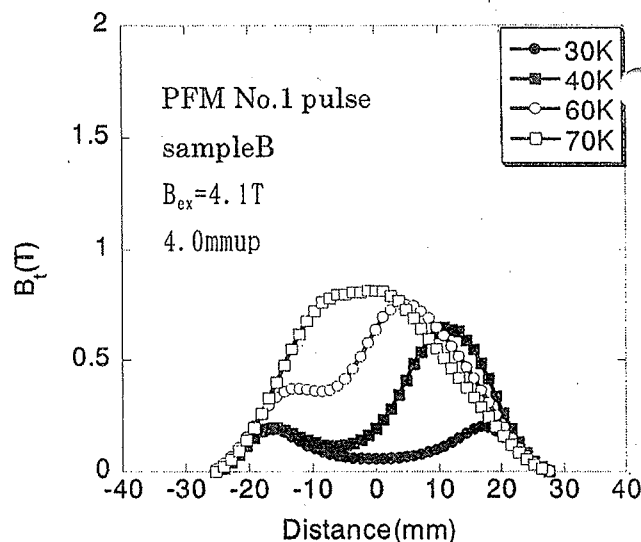


図 4 捕捉磁場分布の断面図

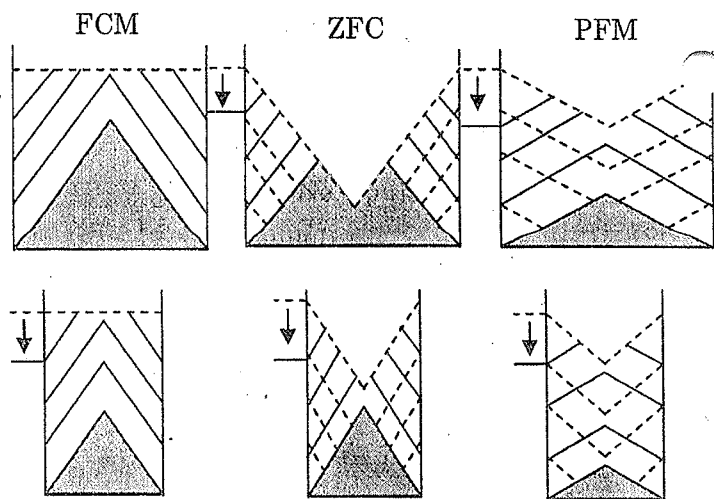


図5 Bean モデルにおいて大型バルクと小型バルクに同じ大きさの印加磁場を与えたときの最終的な捕捉磁場のモデル図(破線が励磁過程、実線が消磁過程)