

超電導バルクのパルス着磁における磁束運動・温度変化シミュレーション

藤代研究室 22211004 小山允

1.序論

超電導体は磁場を加えることで通常の永久磁石よりもはるかに高い磁力を持つ永久磁石となる磁場捕捉特性があり、この特性を用いて磁気分離、モーター、ドラッグデリバリーシステム、マグネットロンスパッタリングなどの様々な工業応用に期待されている。

超電導体への着磁法の一つに着磁コイルにパルス電流を流し磁場を発生させることで超電導体に磁場を捕捉させるパルス着磁(PFM)法がある。PFMは実験装置が安価で携帯できるほど小型な点から工業応用に適している。しかし、PFM法での着磁は短時間で磁場を印加するため磁束運動が激しいため、発熱量が大きく、他の着磁法よりも捕捉磁場が低いという問題点がある。そこで、本研究室では局所温度と捕捉磁場を計測することで多くの基礎データを蓄積して磁束運動のメカニズムを解明して更なる捕捉磁場向上を目指し研究してきた。さらに、実験結果を元にバルク超電導体内での有限要素法を用いて PFM 中の温度変化と磁場運動について解析的に研究を行うことでバルク内部での磁束運動の再現を行なってきた。

これまで PFM に用いられる磁化コイルは超電導体の外周部に配置する solenoid のみであったが、近年超電導体を挟み込むように配置する vortex 型を用いた着磁が solenoid での着磁に比べ発熱量が小さいことから更なる捕捉磁場向上が期待されている。そこで、本研究では電磁気と温度の連成方程式を用いた解析によって vortex と solenoid それぞれの着磁中における超電導体内部での磁束運動について比較、再現を行った。

2.実験

解析モデルとして円柱バルク(REBCO 系: 45 mm ϕ , 15 mmt)、着磁コイルには 116 mm、高さ 50 mm の solenoid と、内径 4 mm、外径 30 mm、高さ 35 mm の一対の vortex の二種類を用いた。図 1 に二次元軸対称の有限要素解析モデルを示す。黄色が超電導バルク、桃色がコイル、水色が Cold stage を示す。解析において超電導体の非線形な E - J 特性は n 値モデルを用い、臨界電流密度 J_c の磁場依存性は(1)式の Kim モデルを用いて計算した。

$$J_c(T, B) = \alpha \left\{ 1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right\}^{\frac{3}{2}} \frac{B_0}{|B| + B_0} \quad (1)$$

定数 $\alpha = 4.6 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ とし、バルクの初期温度 T_s を 40 K、パルス磁場 $B_{ex}(t)$ は立ち上がり時間 $\tau = 0.01 \text{ s}$ とする。また、印加磁場は 1~12 T の範囲で印加した。

3.結果

図 2 にバルク表面中心における捕捉磁場の印加磁場依存性を示す。(左)図は Ida らの実験結果[1]を示し、(右)図は本研究での解析結果を示す。グラフが示すとおり Vortex は低磁場から磁束を捕捉し始め、Solenoid よりも捕捉磁場が大きいこ

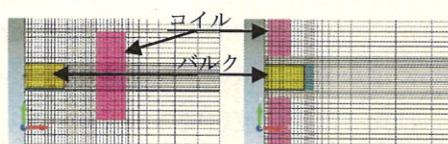


図 1. 解析モデル

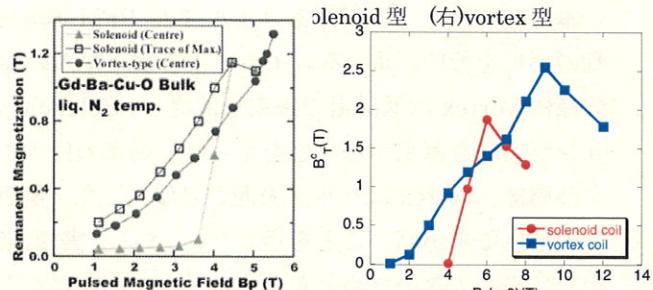


図 2. バルク表面の捕捉磁場における印加磁場依存性

(左)Ida らの実験結果 (右)本研究の解析結果

とをシミュレーションで再現した。

次に各コイルを用いて PFM した場合の着磁中($t=0 \sim 7$ s)の磁束運動と温度変化について調べた。図 3 に Solenoid での初期温度 $T_s = 40$ K, 印加磁場 $B_{ex} = 7$ T での着磁中における磁束運動の解析結果を示す。solenoid の場合磁束は磁場印加時($t=0.01$ s)、バルク外周部から内部にむかって侵入し、磁場印加後($t=0.05$ s)も磁束は運動を続け $t=7$ s の時ほぼ収束した。温度は磁場印加時($t=0.01$ s)バルク外周部、特に縁の部分で激しい発熱を生じた。これはバルク外周部の縁で磁場凝縮が起こっていることを示す。磁場印加後($t=0.05$ s)、熱はバルク内部へ伝熱することで拡散した。また、この時内部へ伝熱すると捕捉磁場も同様に減少した。

図 4 に vortex での初期温度 $T_s = 40$ K, 印加磁場 $B_{ex} = 7$ T での着磁中における磁束運動の解析結果を示す。図が示すように vortex の場合磁束は磁場印加時($t=0.01$ s)、バルク表面から内部にむかって侵入した。また、特に磁束はバルク中心付近の表面から多く侵入した。このため vortex では低印加磁場で磁束が捕捉されることがわかる。磁場印加後($t=0.05$ s)、磁束は運動を続け $t=7$ s の時ほぼ収束した。温度は磁場印加時($t=0.01$ s)、バルク表面と底面で最も発熱が生じた。これは vortex の場合バルク表面と底面で磁場凝縮が起こっていることを示す。磁場印加後($t=0.05$ s)、熱はバルク内部へ伝熱することで拡散した。solenoid の温度分布に比べ vortex の方が明らかに温度分布は低い。この結果から vortex は solenoid に比べ臨海電流密度の低下が少ないため捕捉磁場が向上したことを示す。

4. 結論

本研究では二つの異なるコイルでの PFM 解析を行うことで着磁中のバルク内部での磁束運動の再現を行い、異なるコイルによる磁束侵入の違いについて調べた。解析の結果、実験結果と同様に Vortex は低磁場で磁束を捕捉し、Solenoid よりも捕捉磁場が高いことからシミュレーションが実験を再現することを示した。磁束の侵入の仕方はコイル毎に異なり solenoid 型はバルク外周部、vortex はバルク表面から侵入した。解析結果より Solenoid での PFM よりも Vortex での捕捉磁場が高いことを示した。しかし、実際の実験では高印加磁場はより高価な装置が必要かつ負担も大きいためどちらのコイルでの着磁が PFM の工業応用に適しているとはいい難い。

参考文献

- [1] Ida et al., Phisica C 412-414 (2004) 638

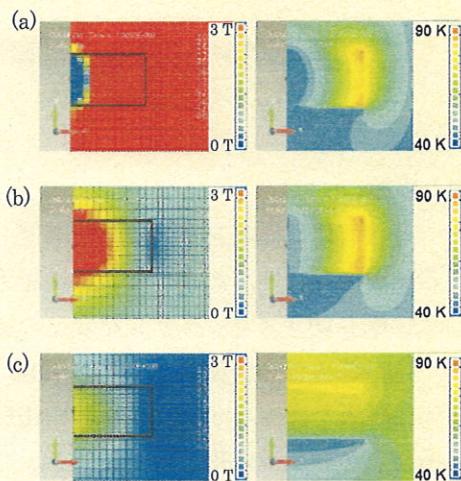


図 4 $T_s = 40$ K, $B_{ex} = 7$ T での解析結果

solenoid 型(左)磁束(右)温度。

(a) 0.01 s (b) 0.05 s (c) 7 s

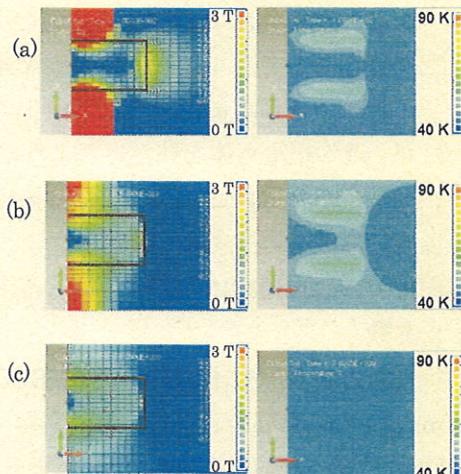


図 5 $T_s = 40$ K, $B_{ex} = 7$ T での解析結果

Vortex 型(左)磁束(右)温度。

(a) 0.01 s (b) 0.05 s (c) 7 s