

超電導マグネットの FCM 後のバルク取り出し時に働く復元力のメカニズムの解明

平成 27 年度入学 藤代・内藤研究室 20215042 千葉誠治

1. Introduction

バルク超電導体は転移温度 T_c 以下において電気抵抗がゼロであるため、電磁誘導を利用した着磁により磁場を捕捉させることで磁石化する。これは超電導バルク磁石と呼ばれ、従来の永久磁石にかわる新たな磁場発生源として応用が検討されている。

一般的な着磁方法として、超電導マグネットにより静磁場を印可する磁場中冷却着磁(FCM)が知られている。この方法で着磁後、マグネットからバルクを取り出す際に復元力が働いていることが確認された。この復元力が大きいと着磁後すぐにバルクを取り出せなくなる可能性が生じる。本研究では FCM 後のバルクに働く復元力とマグネットの磁場変化を測定し、それらのメカニズムを解明することを目的とする。

2. Experimental procedure

着磁させるバルクには Eu46-3-1(外径 64mm、内径 40mm、厚さ 20.5mm、2 重リング補強あり)を使用した。100Kまで冷却後、2.35T の磁場を印可し、42Kまで冷却しその後脱磁を行い着磁した。Fig.1 に実験装置の概略図を示す。冷凍機の背面と荷重計を連結させ、ハンドルを回転させることで引き抜き時、及び押し込み時それぞれの場合における復元力(N)と移動距離(cm)の関係を測定した。Fig.2 にマグネットの簡略的な回路図を示す。電流リードを電源から外した状態で上記と同様の測定を行うことで復元力に差がないかを調査し、誘導電流がどのような回路で流れているかを確認した。さらに引き抜き後、マグネットに継続して誘導電流が誘起されているのか、誘起されている場合は減衰するまでにどれくらいの時間がかかるのかをマグネットの磁場を測定することで考察した。

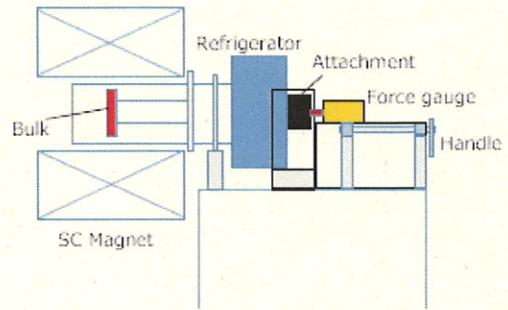


Fig.1 実験装置の概略図

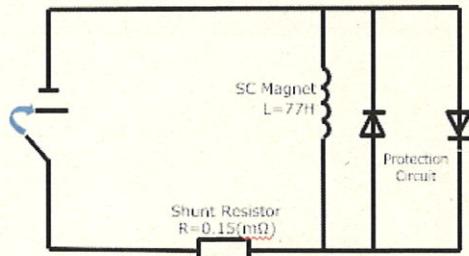


Fig.2 超電導マグネットの回路図

3. Experimental results

Fig.3 に引き抜き時、押し込み時それぞれの場合におけるバルクにかかる復元力の移動距離依存性を示す。引き抜き時においては 5~7cm で復元力はピークに達し、その後減少が見られた。これは電磁誘導により発生したマグネットの磁場がバルクから受けている磁場の損失分に近づくことでピークに達した後、復元力は低下したと考えられる。一方押し込み時では、着磁位置に戻るにつれ復元力は増加した。この時、レンツの法則に従いバルクの磁場の向きと逆向きに磁場が発生するようにマグネットに誘導電流が流れ、引き抜き時と逆向きに復元力が増加したと言える。Fig.4 に

電流リードを電源から外した際の引き抜き時、押し込み時それぞれの場合におけるバルクにかかる復元力の移動距離依存性を示す。引き抜き時、押し込み時ともに Fig.3 の時と同様に復元力の変化が確認された。Fig.2 のマグネットの回路を考えると、この時発生した誘導電流は保護回路の方へ流れたのではないかと考えられる。

Fig.5 にバルク引き抜き後のマグネットの磁場の時間依存性を示す。減衰はしているものの、磁場が発生しているのが確認できる。よって、引き抜き後も超電導コイルに継続して電流が誘起されていることが確認できる。Fig.2 に示された回路より、超電導コイルの自己インダクタンス L は 77H であり、シャント抵抗の抵抗値 R は $0.15\text{m}\Omega$ である。この時、この回路に流れる誘導電流が減衰する時間を初期値の $1/e$ に減衰するまでの時間(e は自然対数の底)、つまり減衰の速度を表す定数である時定数 τ で表すことができ、 $\tau t = L/R = 513 \times 10^3(\text{sec.})$ と求めることができる。また、流れる電流を I 、時間を t とすると、時定数を用いることで $I = I_0 \exp(-t/\tau)$ (I_0 は電流の初期値) と表すことができる。この式を自然対数で表すと $\log I = \log I_0 + (-t/\tau)$ となる。コイルを貫く磁束 Φ は $\Phi = LI$ と表せるので磁場においても先ほどの式を適用できる。Fig.6 に磁場の自然対数の値の時間依存性を示す。この時の傾きの逆数の値が τ に相当する。Fig.6 より求められた時定数を τ_e とすると、 $\tau_e = 1.72 \times 10^3(\text{sec.})$ である。 τ_t との誤差の原因はリード線や電源の抵抗が関与したためと考えられる。以上の結果より外部に誘導電流を流すことで磁場の減衰は可能であることが確認できた。

4. Conclusion

本研究では FCM 後のバルクに働く復元力とマグネットの磁場変化を測定し、それらのメカニズムを考察した。

実験結果より、引き抜き時にバルクにかかる復元力はピークを越えた後に減少し、押し込み時は着磁位置に近づくにつれ増加することが確認できた。また、電流リードを電源から抜いた際にも復元力の変化が見られた。この時誘導電流は保護回路へ誘起されたと考えられる。バルク引き抜き後もマグネットには磁場が発生していたため、超電導コイルに継続して誘導電流が流れていることが確認できた。その電流が減衰するまでに 1.72×10^3 秒かかることが実験結果より求められた。減衰時間を短縮するためにはシャント抵抗よりもさらに大きな抵抗をつなぐ必要があることが明らかとなった。

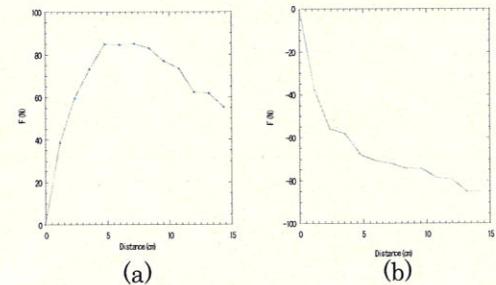


Fig.3 (a)引き抜き時、(b)押し込み時のバルクにかかる復元力の移動距離依存性

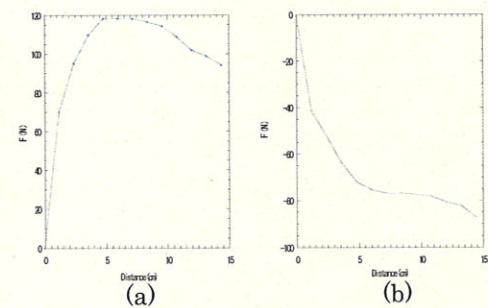


Fig.4 電源リードを抜いた際の(a)引き抜き時、(b)押し込み時のバルクにかかる復元力の移動距離依存性

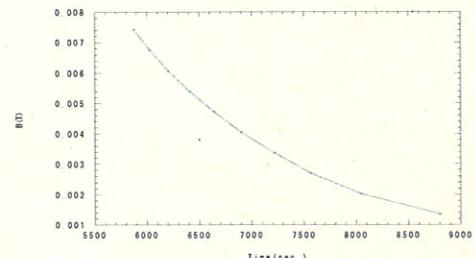


Fig.5 バルク引き抜き後のマグネット磁場の時間依存性

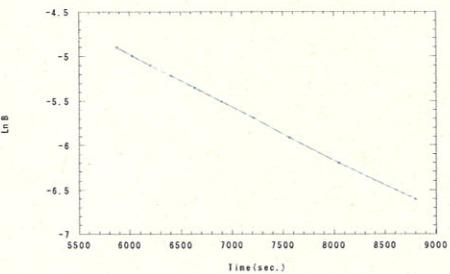


Fig.6 バルク引き抜き後のマグネット磁場の自然対数の値の時間依存性