

MgB₂ 及び REBaCuO 超電導バルクのパルス着磁特性とシミュレーション解析

平成 26 年度入学 藤代・内藤研究室 22214035 望月豪彦

1. 序論

超電導体バルクは擬似永久磁石として、磁気分離、磁気浮上、核磁気共鳴 (NMR) マグネットの応用として期待されている。実用的な超電導バルクとして主に REBaCuO (RE:希土類元素または Y) バルクと MgB₂ バルクが研究されている。REBaCuO バルクは 17 T 以上の捕捉磁場を実現でき、機械的強度を上げることができればさらに高い磁場を発生することが可能である。一方、MgB₂ バルクは REBaCuO に比べ電磁気的異方性が低く、コヒーレンス長が長いことから多結晶体でも容易にテスラ級バルク磁石にできるが、高磁場側での急激な臨界電流密度 J_c の低下が問題である。超電導バルクを着磁する方法はバルク性能を最大限に引き出す磁場中冷却着磁 (FCM) 法が一般的であるが、超電導マグネットを用いることから装置が大型化し、使用場所が限られてしまうため応用には適していない。そこで銅コイルを用いるパルス着磁 (PFM) 法が期待されている。装置を小型にでき、コンデンサーバンクを持ち運ぶことができればどこでも短時間で着磁することが可能である。しかし、十数ミリ秒のパルス磁場を印加するため、粘性力やピン止め損失によるバルクの発熱が J_c を低下させることや、局所的な発熱が歪曲した磁場分布を生み出すといった問題が多く存在する。MgB₂ バルクにおいては小さい比熱と高い J_c により発生する Flux-jump の回避が急務となっている。東京海洋大学の井田らは REBaCuO バルクの上下に渦巻き型コイルを設置したパルス着磁特性を報告した。藤代らのシミュレーション解析から、Solenoid コイルよりも低磁場から磁束が侵入し、捕捉磁場が高いことから着磁効率がよいことが明らかになった。さらに、大型バルクや列状・面上配列のバルクを着磁できる有効な着磁コイルである。本研究では、GdBaCuO バルクと MgB₂ バルクに対し Solenoid コイル (Fig. 1(a)) とコイル中心に軟磁性体 yoke を挿入した渦巻き型コイルと類似の Split コイル (Fig. 1(b)) を用いたパルス着磁特性を明らかにする目的で実験とシミュレーション解析を行った。

2. 実験方法

GdBaCuO バルク ($\phi=30$ mm, $t=15$ mm) は TSMG (Top Seeded Melt Growth) 法で作製し、MgB₂ バルク ($\phi=22$ mm, $t=18$ mm) は HIP (Hot Isostatic Pressing) 法で作製した。Split コイルを用いた PFM は、専用銅ホルダにバルクを固定し ab -plane を冷却方向として冷凍機冷却した。Solenoid コイルを用いた PFM は、補強 SUS リングにマウントしたバルクをコールドヘッドに設置し、 c -axis を主な冷却方向として冷凍機冷却した。その後、パルスの立ち上がり時間がそれぞれ 18 ms と 13 ms のパルス磁場を印加した。局所磁場はバルク表面中心に設置したホールセンサーを用いて測定し、捕捉磁場分布はバルク表面 1 mm 上方または 2 mm 上方において 1 mm ピッチで走査し測定した。シミュレーションは株式会社トヨタの PHOTO-EDDY、PHOTO-THERMO を用いて軸対称モデルを構築し、有限要素法により解析を行った。

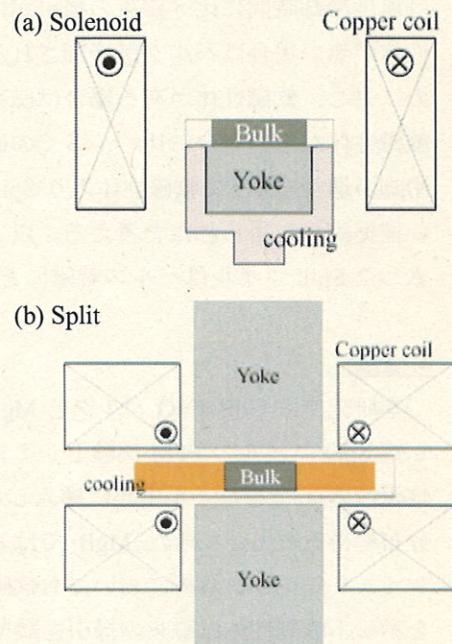


Fig. 1 (a)Solenoid コイル装置と
(b)Split コイル装置の概略図

3. 結果と考察

Fig. 2 に GdBaCuO バルクにおける捕捉磁場 B_T の印加磁場 B_{ex} 依存性を示す。初期温度 T_S の低下により立ち上がり磁場が高磁場側にシフトしている。これはバルク温度の低下が J_c を増加させ、粘性力やピン止め力を増加させるため、強い印加磁場が必要になるからである。各 T_S において Split コイルを用いた捕捉磁場は Solenoid コイルに比べ高い磁場と非常に均一な磁場分布を実現している。REBaCuO における ab -plane の熱伝導率は c -axis よりも大きいため、Split コイル着磁装置ではバルク冷却が速いことも高い捕捉磁場を得た要因であるといえる。

Fig. 3 は MgB₂ バルクにおける捕捉磁場の印加磁場依存性を示す。Split コイルは Solenoid コイルよりも立ち上がり磁場が低磁場側にシフトしており、磁束侵入が容易であるといえる。MgB₂ においても軟磁性体を設置した Split コイルが効果的であり、MgB₂ バルクにおいては軟磁性体を除いた Split コイルの PFM も行った。軟磁性体を除くと、Flux-jump が発生していないが捕捉磁場が減少していることがわかる。つまり、軟磁性体が PFM 過程に影響を与えていると考える。

Fig. 4 にシミュレーションにおける 300 ms での磁束分布を示す。軟磁性体が無い場合は磁束が外側に逃げているが、軟磁性体が有る場合、磁束は軟磁性体に集中している。パルス着磁では温度冷却時間に比べ磁束の掃引がはるかに速い。つまり軟磁性体が無い場合はバルクが冷却される前に磁束が逃げてしまうのに対し、軟磁性体が有る場合は磁束の掃引が緩やかになり、軟磁性体が無い場合に比べ、多くの磁束が存在している状態で冷却が進む。よって軟磁性体入り Split コイルを用いることで高い捕捉磁場を得られたと考える。以上の結果から軟磁性体を挿入した Split コイルはパルス着磁にとって有効であるといえる。

4. 結論

本研究では GdBaCuO バルクと MgB₂ バルクに対し、Solenoid コイルとバルクの上下に銅コイルを設置した Split コイルの PFM 実験とシミュレーション解析を行った。GdBaCuO バルクと MgB₂ バルクともに軟磁性体 yoke をコイル中心に挿入した Split コイルによる着磁において高い捕捉磁場と非常に均一な磁場分布を得ることができた。MgB₂ では Flux-jump が発生せず、PFM で初めて 1.10 T の捕捉磁場を実現した。シミュレーション解析においても軟磁性体を挿入した Split コイルが Solenoid コイルよりも高い捕捉磁場を示し、軟磁性体は磁束の掃引を緩やかにし、磁束を y 軸方向に揃える働きをしていると考えられる。以上より軟磁性体を挿入した Split コイルを用いた PFM は非常に有効であることが明らかになった。

