

# 円柱状 Y-Ba-Cu-O バルクにおけるパルス着磁と磁束侵入挙動に関する研究

平成 23 年度入学 藤代・内藤研究室 20211046 相馬史弥

## 1. Introduction

高温超電導である RE-Ba-Cu-O (RE:希土類元素) バルクは従来の永久磁石に比べて高い捕捉磁場を得られることから、擬似永久磁石として磁気浮上や MRI 応用が期待されている。超電導バルク磁石研究において、超電導マグネットを用いる磁場中冷却着磁法(FCM)が一般的であるが、パルス着磁法(PFM)は着磁に銅コイルを用いるため、着磁装置がコンパクトで経済的で安価である。しかし磁束の粘性力・ピン止め力損失によるバルクの発熱により捕捉磁場が FCM に比べ低いことが知られており、侵入する磁束が増えると発熱が大きくなるため高磁場印加ほど温度上昇が大きい。溶融法によって作製した RE-Ba-Cu-O バルクはバルク表面に結晶成長領域(GSR)・成長領域境界(GSB)が観察され、GSB は結晶粒界であるためピン止め力が GSR に比べて強い。そのため GSR の臨界電流密度( $J_c$ )は GSB に比べて低く一般的に PFM では GSR から磁場侵入が始まり、GSB に捕捉されるという磁束侵入挙動をすることが知られている。中心部をくりぬいた円筒状バルクを 6 層に積層させた Eu-Ba-Cu-O に FCM で着磁を行うと 4.7 T という高磁場で均一な磁場分布を実現できたという報告がされている。これは均一な磁場分布が要求される MRI 応用としての利用が見込まれ、PFM においても高磁場で均一な磁場分布実現が期待される。

本研究ではパルス着磁法を用いて高磁場で均一な磁場分布実現のため、円柱状・円筒状バルクのパルス着磁特性とビーンモデルの比較から磁束侵入挙動を明らかにすることを目的とし研究を行った。

## 2. Experimental

本研究で用いたバルクは溶融法で作製した円柱状 Y-Ba-Cu-O バルク(直径 26 mm, 厚さ 11.6 mm)、中心部をくりぬいた円筒状 Y-Ba-Cu-O バルク(内径 14.3 mm, 外径 30.6 mm, 厚さ 15.95 mm)である。バルクの機械的強度を向上させるためバルクはステンレスリングで補強されている。円柱状・円筒状バルクを冷凍機で伝導冷却し、銅コイルを用いてパルス磁場を印加した。捕捉磁場( $B_{\text{f}}$ )は axial ホールセンサーによりバルク表面中心で測定し、温度はステンレスリング側面に設置した cernox 抵抗温度計で測定した。パルス磁場を印加後 axial ホールセンサーをバルク表面から 1 mm 上方で移動させ、磁場分布測定を行った。

またバルク全体の  $J_c$  を一定と仮定し、バルク内の温度変化を考慮に入れた捕捉磁場分布の予測モデルである拡張型ビーンモデルを用いて円柱状・円筒状バルクについて捕捉磁場分布評価を行った。

## 3. Results and discussion

Fig.1 に初期温度( $T_s$ ) 65 K における円柱状バルクの捕捉磁場断面図を示す。この結果から低磁場印加(1.53 T)では M 字型の分布、高磁場印加(5.49 T)では円錐型の分布が得られていることがわかる。

Fig.2 に円柱状バルクのビーンモデル概略図を示す。図内の実線が温度上昇一定と仮定した理想的な分布、点線が温度変化を考慮に入

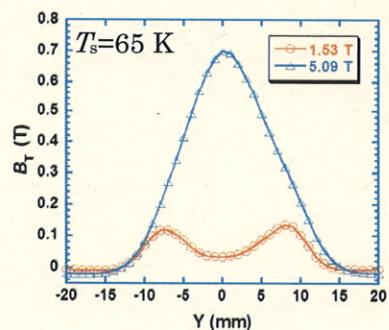


Fig.1  $T_s=65$  K における  
円柱状バルクの捕捉磁場 Y 軸断面図

れた分布である。温度変化を考慮に入れた分布は、バルクの発熱による温度上昇のため  $J_c$  が低下し、それが磁場分布の勾配・捕捉磁場ピークへ影響を与えるため図の点線部のような分布となると考える。中心到達磁場 ( $B^*$ ) は  $B^* = (1/2)\mu_0 J_c d$  で与えられ  $J_c$  やバルクの直径  $d$  に比例して大きくなる。このビーンモデルから低磁場印加 ( $B_{ex} = B^*$ ) ではバルク中心部まで磁束が侵入できていないため M 字型の分布、高磁場印加 ( $B_{ex} = 2B^*$ ) ではバルク中心部まで磁場が侵入できたため円錐型の分布が得られると予測される。そしてこの結果は Fig.1 の実験結果と一致している。

Fig.3 に  $T_s = 40$  K における円筒状バルクの捕捉磁場断面図を示す。この結果から  $T_s = 40$  Kにおいては、高磁場印加時 (5.53 T) で中心部が凹んだ不均一な磁場分布が得られていた。

Fig.4 に円筒状バルクのビーンモデル概略図を示す。円筒状バルクでは中心部がくり抜かれており、中心部では  $J_c = 0$  であるため平らな磁場勾配となるため図のような捕捉磁場分布が得られていると考えられる。このビーンモデルから高磁場印加ではバルク中心部で均一な磁場が得られると予測される。しかし Fig.3 の実験結果と比較すると、 $T_s = 40$  K の高磁場印加時の磁場分布はビーンモデルのような中心部で均一な磁場は得られていない。この原因としてビーンモデルと実際のバルクでの  $J_c$  の異なりとバルクの発熱による温度上昇の影響が考えられる。ビーンモデルはバルク全体で  $J_c$  が一定であることが前提の磁場分布であるが、実際のバルクでは GSR・GSB の影響によりバルク全体の  $J_c$  が一定とは限らない。また今回バルクの発熱により最大 4.9 K の温度上昇があり、バルク全体の捕捉磁場が低下したことも影響すると考えられる。

#### 4. Conclusion

円柱状・円筒状 Y-Ba-Cu-O バルクのパルス着磁を行い、パルス着磁特性と磁束侵入挙動を明らかにすることを目的とした。円柱状バルクでは、 $T_s = 65$  K で高磁場印加 (5.09 T)において、ビーンモデルと一致した円錐型の理想的な磁場分布が得られた。円筒状バルクでは  $T_s = 40$  K で高磁場印加 (5.53 T)においてビーンモデルのような均一な捕捉磁場を得られなかった。この原因として、ビーンモデルと実際のバルクの  $J_c$  の異なりとバルクの発熱による温度上昇の影響が考えられる。そのため作製方法・着磁方法の検討により、 $J_c$  を一定に近づけ温度上昇を軽減させることができることが、磁場の均一性向上につながると考える。

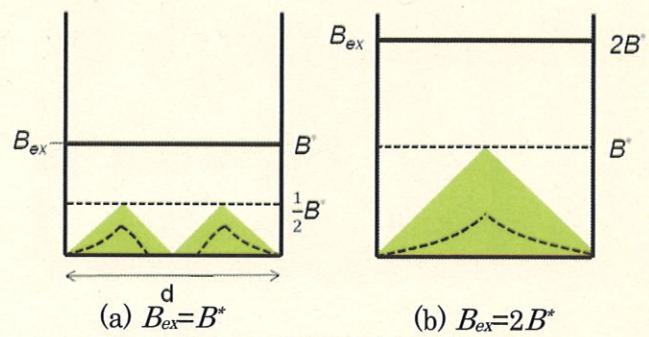


Fig.2 円柱状バルクの  
(a)印加磁場( $B_{ex}$ )=中心到達磁場( $B^*$ ), (b) $B_{ex}=2B^*$   
におけるビーンモデル概略図

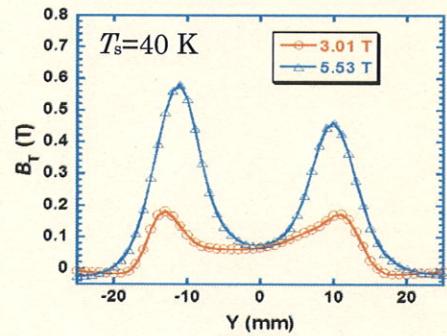


Fig.3  $T_s = 40$  K における  
円筒状バルクの捕捉磁場 Y 軸断面図

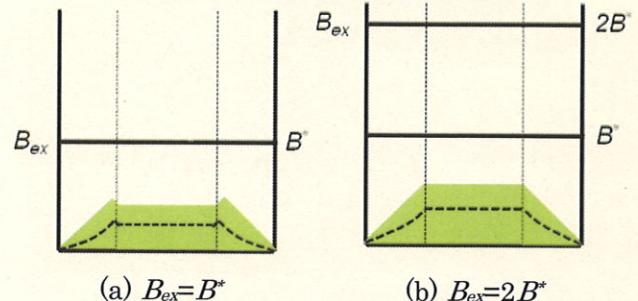


Fig.4 パルス着磁による円筒状バルクの  
(a) $B_{ex}=B^*$ , (b) $B_{ex}=2B^*$ における  
ビーンモデル概略図