

# REBaCuO 系超電導バルクのパルス着磁シミュレーションに関する研究

平成 24 年度入学 22212020 藤代研究室 田村拓也

## 1. 序論

近年、RE 系バルクのパルス着磁(PFM)は磁場中冷却着磁法(FCM)の代用として盛んに研究されている。なぜなら、PFM は安価であり、実験装置が小型であり、大型で高価な超伝導マグネットを必要としないためである。本研究室では実験的にさまざまな初期温度  $T_s$  と印加磁場  $B_{ex}$  での PFM で温度  $T$  および局所磁場  $B_z$  の時間依存、RE 系バルクの表面上の捕捉磁場  $B_z$  を測定した。これによって捕捉磁場  $B_z$  を向上させるためには、 $J_c$  の強化のために温度上昇  $\Delta T$  の減少と低いバルク初期温度  $T_s$  が効果的であることがわかった。しかし、PFM 法の 1 つである MMPSC 法によって最大捕捉磁場  $B_z=5.20$  T (PFM のデータでの最高記録値) を記録して以来、PFM の捕捉磁場の調査では捕捉磁場の向上はほとんど見られない。そこで、捕捉磁場のさらなる向上のため、PFM 中での超伝導バルクの磁束運動や温度上昇のシミュレーション解析を行い、実際の実験データと比較、検討を行うことが重要である。

本研究室のほとんどの PFM のシミュレーション解析では、超伝導バルクのモデルの熱伝導率と比熱は温度に依存しない定数を用いて解析を行っていた。しかし、実際の PFM 中はバルクでの温度上昇が大きく、シミュレーション解析でも実際の実験を想定して、超伝導バルクの熱伝導率、比熱には温度に対する関数を用いるべきである。

本研究では実際の GdBaCuO 超伝導バルクの PFM を参考にモデルを作製し、有限要素法を使用したシミュレーション解析を行う。その際、定数または温度に対する関数にした熱伝導率、比熱を超伝導バルクの解析モデルに使用し実験結果と比較し、考察する。

## 2. 実験方法

本実験では有限要素法を用いて、軸対称モデルの電磁場と温度の連成解析を行うシミュレーション解析ソフトである(株)フォトンの PHOTO-Series EDDY-THERMO を用いて有限要素法により解析を行った。用いた  $J_c$  の磁場依存性は(1)式に示す Kim モデル用いた。  $B=0$  の時の  $J_c$  値である  $J_{c0}$  の温度依存性は(2)式に示す。

$$J_c = J_{c0} \frac{B_0}{|B| + B_0} \quad (1)$$

$$J_{c0} = \alpha \left\{ 1 - \left( \frac{T}{T_c} \right)^2 \right\}^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

$B_0$ ,  $\alpha$ ,  $T_c$  はそれぞれ定数であり、 $B_0=1.3$  T,  $T_c=92$  K を用い、 $\alpha$  値は実験での測定データをもとに設定した。

解析モデルは SUS リングにマウントした直径 46 mm、厚さ 15 mm の新日鐵住金製 GdBaCuO 超伝導バルクおよび、磁場印加のためのソレノイドコイル(内径 83 mm, 外径 114 mm, 高さ 50 mm)を想定し作成した。超伝導のパラメータには、熱伝導率  $\kappa_{ab}=20$  W/mK,  $\kappa_c=4$  W/mK, 比熱  $C=132$  J/kgK または、Fig.1 に示す熱伝導率  $\kappa_{ab}(T)$ ,  $\kappa_c(T)$  と比

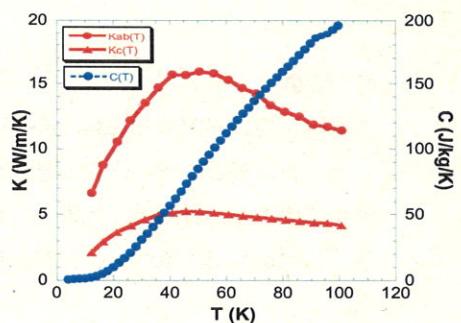


Fig.1 热伝導率、比熱の温度依存性

熱 C (T)を使用した。バルク初期温度  $T_s$  および、パレス印加磁場  $B_{ex}$  は実際に実験で測定した値である  $T_s=40$  K, 77 K,  $B_{ex}=2.272$  T~6.979 T の範囲でシミュレーション解析を行った。

### 3. 結果と考察

Fig.2 に  $T_s=40$  K での実験値にフィッティングさせ、 $\alpha$  値を定めた時の、 $T_s=40$  K, 77 K におけるバルク表面 1mm 上方の中心捕捉磁場の印加磁場依存を示す。破線は実験結果である。 $\kappa, C$ =定数の時、 $\alpha=6.9 \times 10^8$  に設定し、 $J_{c0}$  値は  $5.04 \times 10^8$  A/m<sup>2</sup> であった。 $\kappa, C$ =関数の時、 $\alpha=8.0 \times 10^8$  に設定し、 $J_{c0}$  値は  $5.84 \times 10^8$  A/m<sup>2</sup> であった。 $T_s=40$  K においてどちらも実験結果の通り中心捕捉磁場が増加し、定性的に実験結果を再生することができた。 $T_s=77$  K においては実験結果と異なり、実験結果が  $B_{ex}=4.630$  T でピークを示したのに対し、解析結果では  $B_{ex}=2.847$  T でピークを示した。これは解析モデルの  $T_s=77$  K での  $J_c$  値が低いためだと考えられる。これから、本解析に使用した  $J_c$ -B モデルは不適だと考えられる。

Fig.3, Fig.4 に  $T_s=40$  K,  $B_{ex}=6.979$  T の時のそれぞれ捕捉磁場 (1mmup), 温度の時間依存性を示す。破線が熱伝導率、比熱を定数にしたもの、実線が関数にしたものである。Fig.3 より磁場は 0.01 s 後から  $r=20$  mm, 10 mm, 中心の順に侵入し、7 s 後中心にもっとも磁場が捕捉され、バルク外周に近づくにつれ捕捉磁場は小さくなっている。Fig.4 の温度の時間依存でも  $r=20$  mm, 10 mm, 中心の順に温度上昇の立ち上がりが遅く、磁場の侵入が外周部からであることがわかる。温度上昇し始める点はどの距離においても熱伝導率、比熱を定数、関数にしたものどちらも一致したが、温度上昇は熱伝導率、比熱を関数にしたものの方が明らかに大きかった。この温度上昇は Fig.3 の捕捉磁場の時間依存性にも反映されており、温度上昇の大きい熱伝導率、比熱を関数にしたものの方が捕捉磁場は小さくなっている。以上により、それぞれのシミュレーション解析結果が実験結果を定性的に示した。

### 4. 結論

本研究では実際の GdBaCuO 超電導バルクの PFM を参考にモデルを作製し、有限要素法を使用したシミュレーション解析を行い、その際、定数または温度に対する関数にした熱伝導率、比熱を超電導バルクの解析モデルに使用し実験結果と比較し、考察する。今回の解析モデルにより、 $T_s=77$  K では実験結果を示さなかったが、 $T_s=40$  K では温度上昇、捕捉磁場の時間依存から定性的に PFM の特徴的な結果が得られることがわかった。

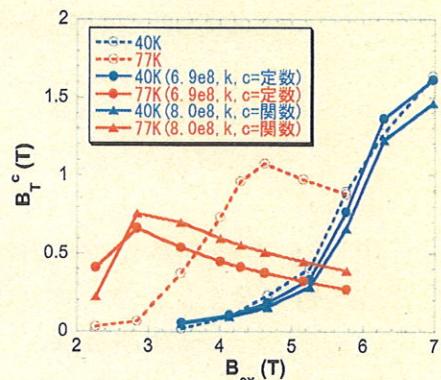


Fig.2 中心捕捉磁場の印加磁場依存性  
(1mmup)

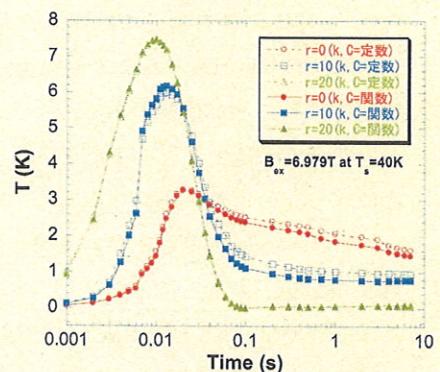


Fig.3 捕捉磁場の時間依存性(1mmup)

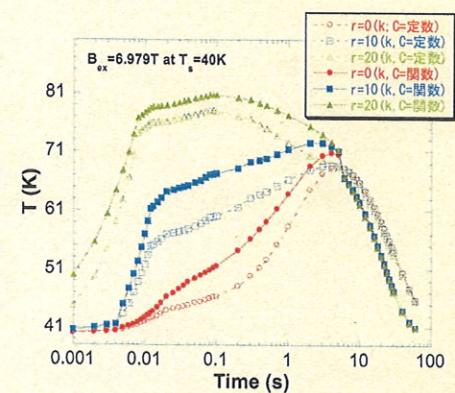


Fig.4 バルク表面温度の時間依存性