

# REBaCuO 系超電導ディスクバルクのパルス着磁における電磁界・温度・応力特性

藤代・内藤研究室 G0317083 下屋敷郁陽

## 1. Introduction

超電導体をバルク磁石として利用するには着磁が必要不可欠である。一般的な着磁方法として  $T_c$  以上の温度から静磁場を印加する磁場中冷却着磁 (FCM: Field Cooled Magnetization) が知られており、最大で 17.6 T の磁場を捕捉させることができるとされる手法である。それに対し、パルス着磁 (PFM: Pulsed Field Magnetization) は  $T_c$  以下の温度で銅コイルを用いてパルス磁場を印加する手法である。FCM に比べ装置が比較的安価・小型化可能・可搬であるなどの利点から、バルク応用には PFM の利用が望ましい。

超電導バルクは高い着磁特性を示す一方で、低い破壊強度が問題となっている。バルクの破壊強度は約 50 ~ 70 MPa 程度であり[1]、バルクを着磁した際にバルク内の誘導電流と磁場による電流-磁気相互作用に伴うローレンツ力が発生し、バルクに破壊挙動が見られることが報告されている[2]。

当研究室の先行研究において、GdBaCuO リングバルクに対し PFM 実験を行ったところ、 $B_{ex}=3.10$  T においてバルクに磁束が捕捉されていない領域が存在することが明らかとなった。我々は着磁した際にバルクに割れが発生したと考え着磁シミュレーションを併用した。解析結果から、PFM 過程においてバルクに圧縮応力が生じており、それが破壊強度を上回るためにバルクが割れ、磁束が捕捉されなかつたと考察している[3]。以上のことから、PFM におけるバルクの破壊挙動の理解は不可欠である。

Wu らは GdBaCuO ディスクバルクに対し PFM を適用したシミュレーション解析を行っているが[4]、バルクの臨界電流密度  $J_c$  の磁場依存性としては Kim モデルを用いている。 $J_c$  の決定には実際のバルクの  $J_c$  を再現した Jirsa モデルを用いることで現実のバルクの破壊挙動を推定することが可能であると考えられる。

本研究では有限要素法を用いて、パルス着磁過程における超電導ディスクバルクの捕捉磁場・発熱・電磁応力を算出し、現実的な  $J_c$  における解析を行った。これにより、パルス着磁中のディスクバルクに対する破壊挙動を解析的に明らかにし、効果的な補強方法の検討を行う。

## 2. Analytical procedure

試料として GaBaCuO ディスクバルク( $\phi 65$  mm ×  $H 20$  mm)、着磁装置として solenoid コイル(O.D.=121 mm, I.D.=99 mm,  $H=50$  mm)を用いて PFM を適用した。バルクはインジウム薄板を挟んでコールドステージに固定し、 $c$  軸方向への冷却を仮定した。初期温度  $T_s$  を 65 K とし、3.5 ~ 6.0 T の強度のパルス磁場 ( $\tau=13$  ms) を印加した。解析には(株)フォトンの商用ソフトウェア Photo-EDDY、THERMO、ELAS を用いて 3 次元有限要素モデルを構築し、PFM 中のバルクの捕捉磁場・温度上昇・電磁応力を算出した。バルクの臨界電流密度  $J_c$  の磁場依存性として Jirsa モデルを用いて  $J_c$  を決定した。(1)に Jirsa モデルの  $J_c$  算出式を示す。

$$J_c = J_{c1} \exp\left(\frac{B}{B_L}\right) + J_{c2} \frac{B}{B_{max}} \exp\left[\frac{1}{k} \left(1 - \left(\frac{B}{B_{max}}\right)^k\right)\right] \quad (1)$$

ここで各パラメータは 65 K において、 $J_{c1}=1.17 \times 10^9$  A/m<sup>2</sup>,  $B_L=0.57$  T,  $J_{c2}=7.56 \times 10^8$  A/m<sup>2</sup>,  $B_{max}=3.0$  T,  $k=1.3$  である。また、捕捉磁場特性に関しては当研究室の先行研究における実験結果との比較を行った。

## 3. Results and discussion

図 1 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。実験結果より、 $B_{ex}=3.5$  T ではバルクの磁束遮蔽効果により磁束はバルク中心まで侵入せず、捕捉磁場は極めて低い値を示した。 $B_{ex} \geq 4.0$  T において捕捉磁場は印加磁場の増大に伴い上昇し、 $B_{ex} \approx 5.5$  T において最大値 ( $\approx 1.8$  T) を示した後に低下する挙動を示した。解析結果は実験結果を定性的に再現しており、定量的にも実験結果と良い一致を示した。

ここで、バルク内の破壊挙動の理解のため、最大捕捉磁場が得られた  $B_{ex}=5.5$  T に着目する。図 2(a), (b) に増磁過程 ( $t \leq 13$  ms) 及び減磁過程 ( $t > 13$  ms) でのバルク中

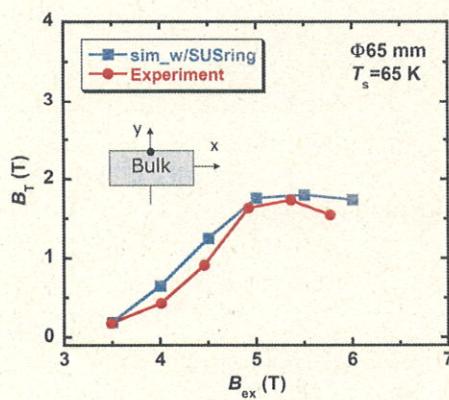


図 1. バulk表面中心における捕捉磁場の印加磁場依存性

心 ( $y=0$  mm) における GdBaCuO バルクの捕捉磁場分布の時間依存性及び挿入図に測定位置を示す。増磁過程では磁束は外周からバルク中心に侵入し、減磁過程では磁束は温度上昇のため外周から次第に減少し、最終的( $t=9000$  ms)に円錐形の捕捉磁場分布を示した。

図 3(a), (b)に増磁過程( $t \leq 13$  ms)及び減磁過程( $t > 13$  ms)でのバルク中心 ( $y=0$  mm) における GdBaCuO バルクの径方向の電磁応力  $\sigma_r$  分布をそれぞれ示す。また、挿入図に測定位置を示す。図 3(a)より、増磁過程において、 $\sigma_r$  は負の値を示した。これは増磁過程ではバルクに圧縮応力が働いていることを表す結果である。また、 $\sigma_r$  は時間経過に伴い圧縮応力が増大する傾向にあった。これは、時間経過に伴い磁束がバルク中心まで侵入したためであると考えられる。また、図 2(a)との比較から、どの時間においても  $\sigma_r$  の最大値は捕捉磁場の立ち上がりと同じ位置で見られた。図 3(b)より、減磁過程において  $\sigma_r$  は時間経過に伴い増加した。これは、減磁過程では増磁過程と異なり、印加磁場が徐々に減衰するため、バルク内の誘導電流が逆方向に流れることに起因して、バルク内に働くローレンツ力の向きが変化していることを表す結果である。また、 $\sigma_r$  は  $t=40$  msにおいて、 $x=9$  mm で最大値(8.16 MPa)を示した後に減衰し、バルク全体で正の値を示した。これは減磁過程ではバルク内に引張応力が働いていることを表す。また、図 3(a)と異なり、 $\sigma_r$  は捕捉磁場の最大値と同じ位置で最大となった。

図 4 にバルクの radial 方向における最大圧縮応力  $\sigma_{com}$  及び最大引張応力  $\sigma_{ten}$  の印加磁場依存性を示す。 $\sigma_{com}$  及び  $\sigma_{ten}$  は印加磁場の増大に伴い単調に増加し、 $B_{ex}=6.0$  Tにおいて最大値( $\sigma_{com}:16.1$  MPa,  $\sigma_{ten}:9.0$  MPa)を示した。これらの値は、バルクの破壊強度(50 ~ 70 MPa)を大きく下回るため、本解析条件では PFM においてバルクの破壊挙動は引き起こされないと考えられる。

#### 4. Conclusion

本研究では  $\phi 65$  mm の GdBaCuO ディスクバルクに対し  $T_s=65$  Kにおいて PFM を適用した場合のバルクの破壊挙動の解明を目的としてシミュレーション解析を行った。解析結果から、PFMにおいて、増磁過程ではバルクに圧縮応力が働き、減磁過程では引張応力が働いていることが分かった。本解析では着磁中のバルクに働く電磁応力はバルクの破壊強度に比べ低く、バルクの破壊現象は引き起こされないことが分かった。当研究室が行つてきた PFM 実験ではディスクバルクの割れは確認しておらず、本解析結果は妥当であると言える。しかし、リングバルクに対する着磁では冷却過程で金属リングから圧縮応力が印加されるため、バルクが破壊される可能性があり、シミュレーション解析によるリングバルクの破壊挙動の推定が必要であると考えられる。

#### 5. References

- [1] H. Fujishiro *et al.*, Supercond. Sci. Technol. 30 (2017) 085008.
- [2] T. Miyamoto *et al.*, Physica C 340 41-50.
- [3] H. Mochizuki *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. 26 (2016) 6800205.
- [4] H. Wu *et al.*, Supercond. Sci. Technol. 31 (2018) 045008.

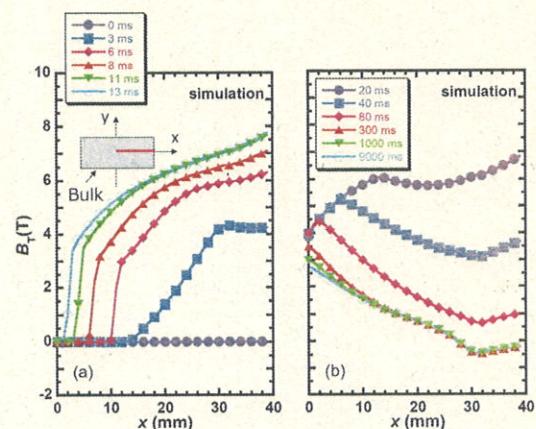


図 2. バルク中心( $y = 0$  mm)の捕捉磁場分布  
(a)増磁過程 (b)減磁過程

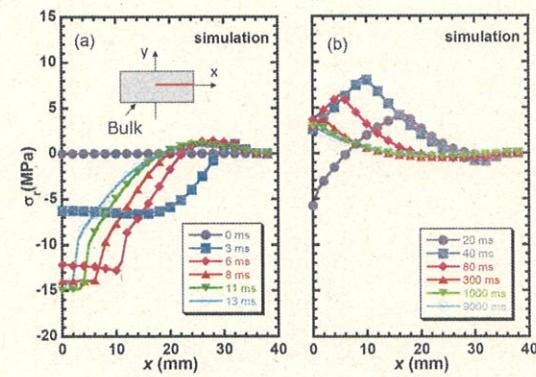


図 3. バルク中心( $y = 0$  mm)の電磁応力分布  
(a)増磁過程 (b)減磁過程

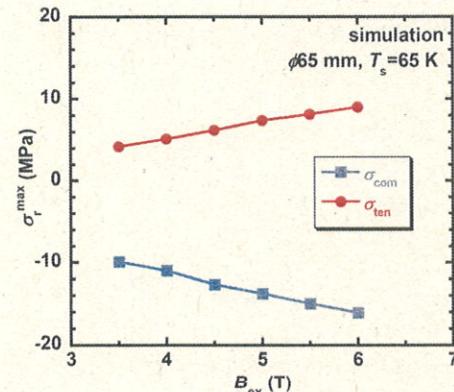


図 4. バルクの radial 方向における最大圧縮応力  $\sigma_{com}$  及び最大引張応力  $\sigma_{ten}$  の印加磁場依存性