

# 超電導バルクの磁場中冷却着磁における電磁界・温度・応力連成解析

藤代・内藤研究室 20214050 難波空

## 1. はじめに

超電導バルクは転移温度  $T_c$  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擬似永久磁石として利用できる。特に、REBaCuO (RE は希土類元素あるいは Y) に代表される高温超電導バルクは 17 T を超える磁場を捕捉できるため、核磁気共鳴 (NMR) や磁気浮上などへの応用が検討されている。

その優れた着磁性能を示す一方で、誘導電流と外部磁場の相互作用に伴うローレンツ力がバルクの破壊挙動をもたらすと報告されている[1, 2]。このとき亀裂は径方向に進展することから、主応力は周方向に作用する電磁フープ応力であるとされている。REBaCuO 超電導バルクはセラミックス材料であることに加え、作製プロセス中に空孔やクラックが発生するため、破壊強度が 50 MPa 程度と低い。補強方法として金属リング嵌めによる外部補強が一般的である。当研究室では、金属リングにより補強したリングバルクの磁場中冷却着磁 (FCM) 中における応力解析に着手している[2, 3]。しかし、これらの解析では温度一定を仮定しており、実際の FCM では着磁中の磁束運動に伴うバルクの温度上昇を考慮しなければならない。本研究では、FCM において異なる 3 つの減磁レートを用いて、ディスクバルクに対し電磁界・温度・応力の連成解析を行った。これにより、ディスクバルクにおける着磁中の温度上昇が電磁氣的及び機械的特性に及ぼす影響を明らかにする。

## 2. 解析方法

REBaCuO ディスクバルク (外径 64 mm、高さ 20 mm) に対し、3次元有限要素モデルを構築した。図 1 にその概略図を示す。ソレノイドコイル (外径 170 mm、内径 120 mm、高さ 200 mm) を用いて外部磁場を印加し、印加磁場  $B_{app}$  を 10 T とした。バルクには着磁中の破壊を防ぐために厚さ 5 mm の SUS リングを装着し、これらは冷凍機のコールドステージにより 50 K まで底面から冷却するとした。その後、3つの減磁レート  $R = 0.222 \text{ T/min}$ ,  $1 \text{ T/min}$ ,  $1 \text{ T/s}$  に従い、印加磁場を 10 ステップで 10 T から 0 T に掃引することで FCM を行った。バルクの超電導電流特性は、磁場と温度に依存する Jirsa モデルにより記述した[4]。電磁界・温度連成解析により、捕捉磁場と温度上昇を算出した。また、応力解析において、バルクおよび SUS リングはフックの法則に従うものとし、着磁中における電磁応力と SUS リングによる熱応力を算出した。

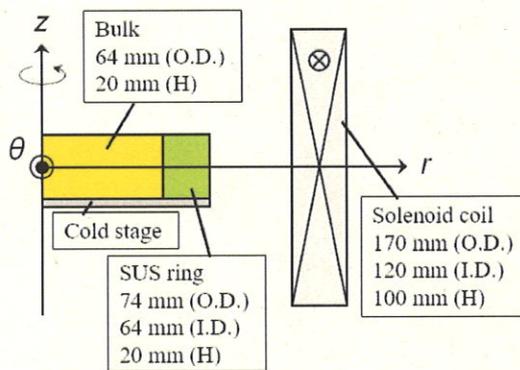


図 1 3次元有限要素モデルの概略図

## 3. 解析結果

図 2 に各減磁レート  $R$  に対するバルク表面中心の捕捉磁場  $B_z$  のタイムステップ依存性を示す。また、 $R = 1 \text{ T/s}$  の step 10 における捕捉磁場分布を挿入図に示す。FCM においては、外部磁場  $B_{ex}$  の掃引に伴って、磁束はバルク外縁から流出する。よって、捕捉磁場はタイムステップの進行に伴って減少し、step 10 において  $R = 0.222 \text{ T/min}$  と  $1 \text{ T/min}$  では 7.9 T であった。また、ステップ依存性について、両者の差は比較的小さい。一方、 $R = 1 \text{ T/s}$  では 7.1 T と低く、減磁レートが速いほど捕捉磁場は低下した。挿入図より、捕捉磁場はバルク中心ほど高く、捕捉磁場分布はバルク磁石特有の円錐形である。

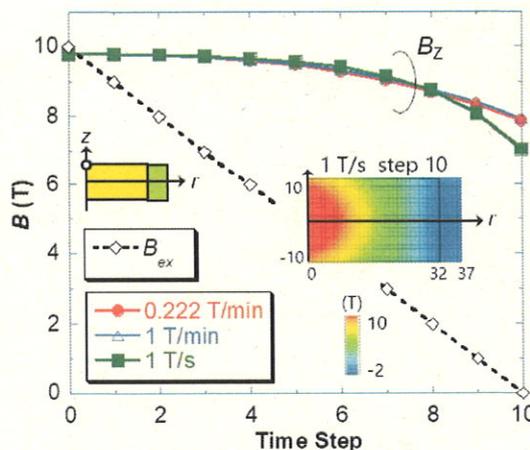


図 2 バルク表面中心における捕捉磁場のタイムステップ依存性

図3に各減磁レート  $R$  に対するバルク表面外縁の温度  $T$  のタイムステップ依存性を示す。また、 $R=1$  T/s の step 10 における温度分布を挿入図に示す。バルク表面外縁の温度は減磁開始と同時に上昇し始め、外部磁場が 0 T となる step 10 において最大となる。その最大値は  $R=0.222$  T/min, 1 T/min, 1 T/s に対して、それぞれ 50.5 K, 52.1 K, 69.7 K であり、減磁レートが速いほど温度が上昇した。挿入図より、バルク外縁において温度上昇が顕著である。この温度上昇はバルク外縁における磁束運動に伴う発熱により引き起こされたものであり、捕捉磁場低下の要因となっている。

図4に各減磁レート  $R$  に対するバルク表面中心の電磁フープ応力  $\sigma_{\theta}^{\text{FCM}}$  のタイムステップ依存性を示す。また、1 T/s の step 6 における  $\sigma_{\theta}^{\text{FCM}}$  分布を挿入図に示す。挿入図よりバルク表面中心に応力が集中していることが確認できる。いずれの  $R$  に対しても、バルク表面中心の  $\sigma_{\theta}^{\text{FCM}}$  は 6 step においてピーク値+67 MPa をとる。その後  $\sigma_{\theta}^{\text{FCM}}$  は減少し、step 10 において  $R=0.222$  T/min, 1 T/min では+50 MPa であった。一方、 $R=1$  T/s に対しては+26 MPa と小さく、 $\sigma_{\theta}^{\text{FCM}}$  は大きく減少している。これは温度上昇に伴う捕捉磁場の低下により、ローレンツ力が減少したためである。

図5に各減磁レート  $R$  に対するバルク表面中心の熱フープ応力  $\sigma_{\theta}^{\text{therm}}$  のタイムステップ依存性を示す。室温から着磁温度 50 K までの冷却過程において SUS リングが収縮することにより、step 0 において補強効果として  $\sigma_{\theta}^{\text{therm}} = -32$  MPa の圧縮応力が印加される。 $\sigma_{\theta}^{\text{therm}}$  はタイムステップの進行に伴い、 $R=1$  T/s では他の減磁レートよりも大きく増大し、その補強効果は -28 MPa まで低下した。これはバルク外縁で生じた発熱が SUS リングに拡散したことにより、SUS リングが着磁中に膨張したため、圧縮応力が低減したことを示している。

#### 4. まとめ

本研究では FCM 中のディスクバルクに対して電磁界・温度・応力連成解析モデルを構築し、適用した。解析結果より、着磁中の磁束運動に伴う温度上昇により  $R$  が速いほど捕捉磁場は低下した。これに伴い、ローレンツ力に基づく電磁フープ応力も減少し、バルク表面中心における応力集中が緩和することが明らかとなった。また、温度上昇は SUS リングによる補強効果を低減することを新たに明らかとした。本解析手法は、着磁中に大きな温度上昇を伴う、高磁場 FCM における応力解析に対して適用することができる。

#### 参考文献

- [1] T. Miyamoto, K. Nagashima, N. Sakai and M. Murakami, *Physica C*, **340**, 41-50 (2000).
- [2] K. Takahashi et al., *Supercond. Sci. Technol.*, **30**, 115006 (2017).
- [3] H. Fujishiro et al., *Supercond. Sci. Technol.*, **30**, 085008 (2017).
- [4] M. Jirsa, L. Pust, D. Dlouhý and M. R. Koblischka, *Phys. Rev. B*, **55**, 3276-3284 (1997).

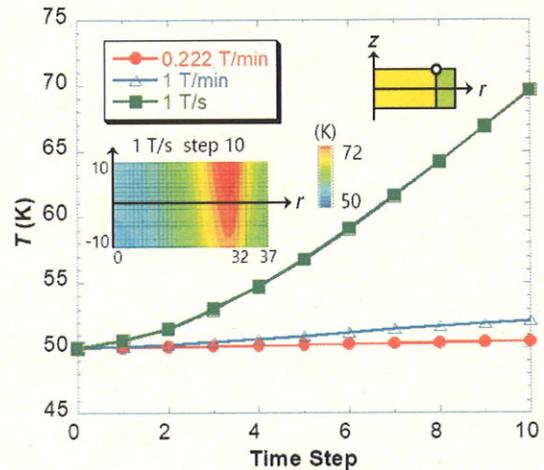


図3 バルク表面外縁における温度のタイムステップ依存性

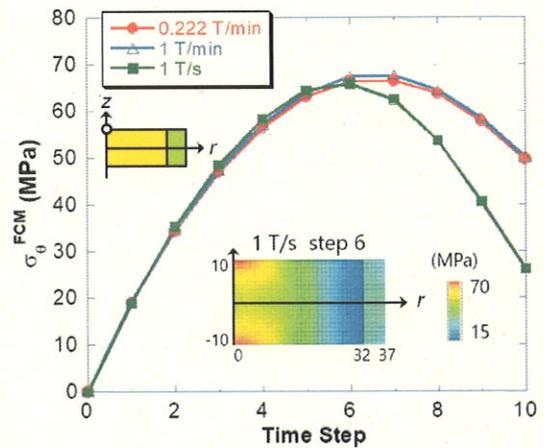


図4 バルク表面中心における電磁フープ応力のタイムステップ依存性

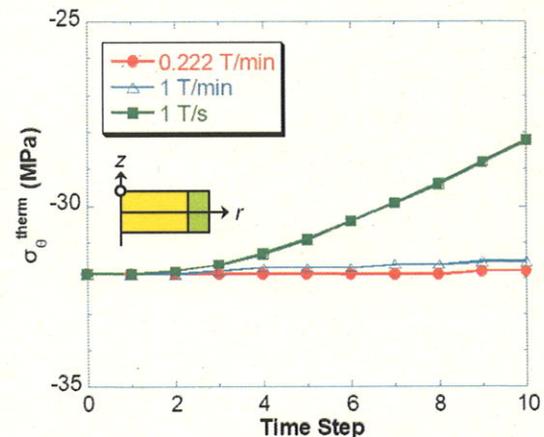


図5 バルク表面中心における熱圧縮応力のタイムステップ依存性