

超電導リングバルクのパルス着磁における熱応力破壊の可能性に関する研究

藤代・内藤研究室 g0320077 新田基己

1. Introduction

REBaCuO 超電導バルク体は、励磁により数-数十テスラ級のコンパクトな強磁場発生源となり得ることから様々な工学的応用が検討されている。超電導バルク体の簡便な着磁法として、 T_c 以下に冷却したバルク体に対し真空容器外部の銅コイルからパルス磁場を供給し、瞬時に着磁を行うパルス着磁(PFM)法が知られている。PFM によって励磁された REBaCuO リングバルクの捕捉磁場は REBaCuO ディスクバルクと異なり、flux jump と呼ばれるバルク内不均一を経路として発生する着磁過程での急激な磁束侵入・流出によって大きく制限されるため、最大捕捉磁場はディスクバルクの 5.2 T [1]に対し、1.3 T [2]程度の報告にとどまっている。一方、応力解析によれば PFM 中のバルクに負荷される電磁界応力がバルクの破壊応力(50~70 MPa)を越えることはなく、破壊の観点で捕捉磁場が制限されることはないと言われてきた。しかし、昨年度我々が行ったリングバルク(内径 36 mm, 外径 60 mm, 高さ 20 mm)の PFM 実験において、印加磁場 3.88 T (@ 40 K)の条件で flux jump および着磁中の割れを確認した。flux jump のパスとなる局所領域は、 T_c 以上まで温度上昇することから [3]、本実験で観測した割れが局所的な熱応力によるものである可能性が示唆された。本研究では発熱領域の異なる 2 つの 3 次元(3D)有限要素モデルを構築し、発熱領域が T_c 以上の温度まで上昇した場合の熱応力解析を行い、PFM 中の熱応力破壊の可能性を検討する。また、内径が異なるリングバルクにかかる熱応力の変化も併せて検討し、熱応力と形状との相関関係を明らかとする。

2. Numerical simulation framework

実験で用いたバルク(外径 60 mm, 内径 36 mm, 高さ 16 mm)を想定し、3D 有限要素モデルを構築した。解析モデルは周方向に 1° ずつ 360° 、径方向に 1 mm ずつ mesh を施した。Figure 1(a)に解析モデルの top view を示す。方位角 ϕ を図のように定義し、 89° から 92° までの計 3° の領域に発熱領域 ϕ_{heat} を設けた。Figures 1 (b), (c)の発熱モデルをそれぞれ Model-1, Model-2 と定義した。Model-1 における ϕ_{heat} は総 mesh 数の 1/120 であり、Model-2 はさらにその 1/21 の mesh 数である。 ϕ_{heat} の最大温度 T_{max} を 90 K から 300 K の範囲で定め、初期温度 40 K から T_{max} までの過熱に要する発熱量 Q (J)をバルク比熱から算出した。また、実験結果に基づき、5 ms で ϕ_{heat} が T_{max} に到達する仮定の下、発熱密度 q (W/m³)を算出し ϕ_{heat} に荷重条件として加えた。 ϕ_{heat} が T_{max} に到達する 5 ms で応力解析を行い、 ϕ_{heat} およびその周辺領域にかかる径方向熱応力 σ_{xx} を求めた。

3. Numerical simulation results

Figure 2 に、Model-1 において、バルク内部にかかる径方向熱応力 $\sigma_{xx}^{\text{heat}}$ の方位角 ϕ 分布を示す。発熱領域内部($\phi=89\text{--}92^\circ$)では熱膨張による変位が発熱近傍領域によって拘束されるため、圧縮応力が主応力となり、 T_{max} の上昇に伴ってその最大値は

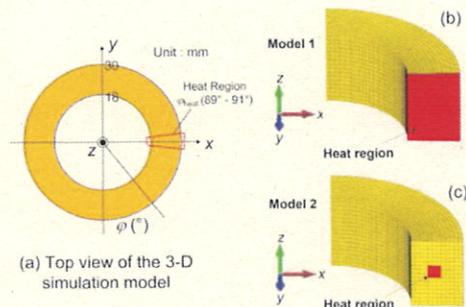


Fig. 1. 3D 解析モデル

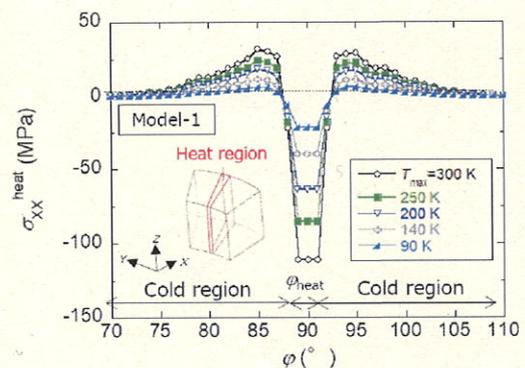


Fig. 2. バルク内部にかかる径方向熱応力 $\sigma_{xx}^{\text{heat}}$ の方位角 ϕ 分布 (Model-1)

上昇している。 $T_{\max}=300\text{ K}$ では100 MPaを超える圧縮応力が発熱領域に負荷されている。これに対し、発熱近傍領域($\varphi < 89^\circ$, $\varphi > 92^\circ$)では引張応力が主応力となっている。Figure 3に、Model-1における T_{\max} 毎の発熱領域内部にかかる熱圧縮応力 $\sigma_{\text{heat}}(\text{comp.})$ 、および発熱近傍領域にかかる熱引張応力 $\sigma_{\text{heat}}(\text{tensile})$ の相関関係を示す。300 K以上のプロットは熱応力の温度依存性から推定した値である。バルクの引張破壊応力 $\sigma_c(\text{tensile})$ はおおよそ50 MPa、圧縮破壊応力 $\sigma_c(\text{comp.})$ はおおよそ250 MPaとされている。Model-1の場合、 σ_{yy} に比べ σ_{xx} が主応力であり、温度上昇に伴ってその値は増加するが、発熱領域内部で径方向熱圧縮応力が $\sigma_c(\text{comp.})$ に到達するより先に近傍領域内部で径方向熱引張応力が $\sigma_c(\text{tensile})$ に到達することがわかる。すなわち、Model-1において熱応力によってバルク内部で破壊が起こる場合、発熱領域近傍での引張応力が原因となる可能性が高い。

Figure 4にFig. 3と同様、Model-2における $\sigma_{\text{heat}}(\text{comp.})$ と $\sigma_{\text{heat}}(\text{tensile})$ の相関関係を示す。バルク内部では σ_{xx} が主応力であるが、Model-1に比べ発熱領域内部での周方向熱圧縮応力は大きい。これは発熱領域が全方向から変位拘束されるためである。Model-2の場合、温度上昇に伴って、発熱近傍領域にかかる熱引張応力が $\sigma_{\text{heat}}(\text{tensile})$ に到達するより先に、発熱領域内部にかかる熱圧縮応力が $\sigma_{\text{heat}}(\text{comp.})$ に到達することから、Model-2においてバルク内部の破壊が起こる場合、発熱領域内部での熱圧縮応力が原因となる可能性が高いことがわかる。しかしながら、いずれのModelにおいても、バルク内部での破壊には400 Kを超える温度上昇が必要であり、PFM中の発熱による温度上昇としては考えにくい。発表ではバルク内部熱応力に加え、Model-1におけるバルク表面の応力集中に起因した、より低温での破壊の可能性についても考察する。さらに、内径の拡大が熱応力集中に与える影響についても言及する。

4. Conclusion

本研究では、リングバルク PFM 中の局所発熱によってバルクに負荷される熱応力を応力解析によって推定した。 $T_{\max} = 300\text{ K}$ を超える場合、バルク内部には100 MPaを超える大きな熱圧縮応力が負荷されることが明らかとなった。従来検討されてきた電磁界応力に加え、熱応力もバルク負荷として検討することの重要性が示唆された。

参考文献

- [1] H. Fujishiro *et al.*, 2006, *Physica C*, **445-448** pp. 399-448
- [2] Y-K. Tshui *et al.*, 2022, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **32**, 4
- [3] V. S. Korotkov *et al.*, 2017, *Supercond. Sci. Technol.*, **30**, 095004

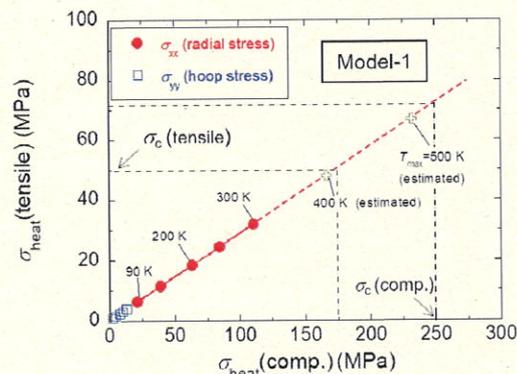


Fig. 3. 発熱領域中心における熱圧縮応力 $\sigma_{\text{heat}}(\text{comp.})$ および発熱近傍領域における熱引張応力 $\sigma_{\text{heat}}(\text{tensile})$ の相関関係 (Model-1)

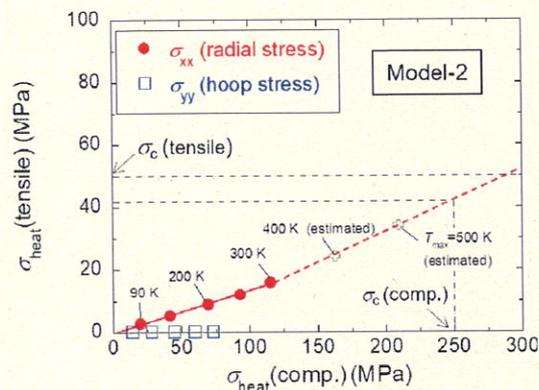


Fig. 4. 発熱領域中心における熱圧縮応力 $\sigma_{\text{heat}}(\text{comp.})$ および発熱近傍領域における熱引張応力 $\sigma_{\text{heat}}(\text{tensile})$ の相関関係 (Model-2)