

# 超電導バルクのパルス着磁におけるコイル形状とヨークの効果

平成 31 年度入学 藤代・内藤研究室 G0319042 鎌田大空

## 1. Introduction

超電導体は超電導転移温度  $T_c$  以下において電気抵抗がゼロであり、電磁誘導を利用した着磁を行うことで擬似永久磁石として利用することができる。

超電導バルクを磁石として応用するための着磁法のひとつであるパルス着磁法 (Pulsed Field Magnetization: PFM) は、銅コイルにより数ミリ秒のパルス磁場を印加する方法である。装置が小型で安価であるため実用化に適しているといわれているが、磁場を印加する際に激しい磁束運動によりバルクが発熱し、捕捉磁場が低下するという問題を有する。また、臨界電流密度  $J_c$  は低温ほど向上するが、ピン止め損失の増大や比熱の減少による温度上昇が大きくなるため、着磁温度の低温化により捕捉磁場が増大するとは限らない。

パルス着磁において着磁コイルの選択により超電導バルクの捕捉磁場特性に影響を与えることが知られている。Fig. 1 に Cambridge 大学の報告[1]における異なる着磁コイルによる GdBCO バルクの捕捉磁場の印加磁場依存性のグラフを示す。Fig. 1 より、着磁温度 40 K において最高捕捉磁場が solenoid coil ではおよそ 2 T、split coil ではおよそ 3.2 T であり、solenoid coil と比較して、split coil による捕捉磁場が高い値を示している。これは Fig. 1 の挿入図に示すように、バルクに対する冷却方向の違いによるものと考えられている。REBCO バルクには異方性があるため、熱伝導率は ab 面方向は c 軸方向の約 5 倍程度であることが知られている[2]。Solenoid coil では c 軸方向、split coil では ab 面方向から伝導冷却によって冷却しているため split coil のほうが冷却効率が優れており、捕捉磁場が高くなったと述べている。一方、solenoid coil と split coil では使用しているコイル形状やヨークの配置などいくつか異なる点があるが、これらがバルクの捕捉磁場特性に与える影響は明らかとなっていない。

以上より本研究では、パルス着磁におけるコイル形状やヨーク配置の異なる超電導バルクの捕捉磁場特性の違いを実験と解析により明らかとすることを目的とする。

## 2. Simulation model

Fig. 2 (a) ~ (f) にコイル形状、ヨーク配置が異なる装置概略図を示す。シミュレーションは 2 次元軸対称で行った。試料として GdBaCuO バルク (直径 54 mm、高さ 15 mm) を用いた。バルク外側には solenoid coil モデルでは SUS (内径 54 mm、外径 76 mm、高さ 15 mm)、split coil モデルでは brass (内径 54 mm、外径 72 mm、高さ 15 mm) を配置した。また、それぞれのモデルにおいて no yoke、bottom yoke、both yokes のモデルを作成し、初期温度  $T_s = 65$  K において印加磁場  $B_{ex}$

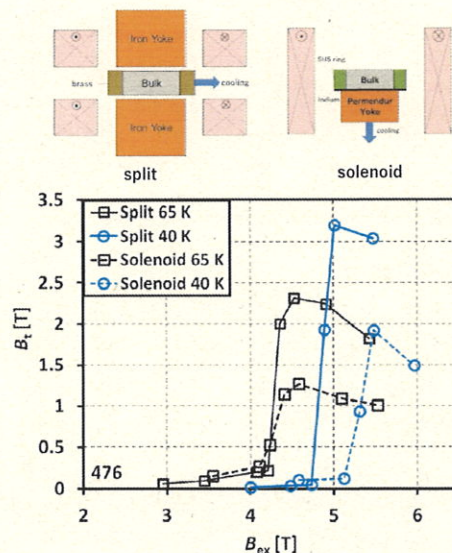


Fig. 1 split coil および solenoid coil の着磁温度  $T_s = 65, 40$  K における捕捉磁場の印加磁場依存性

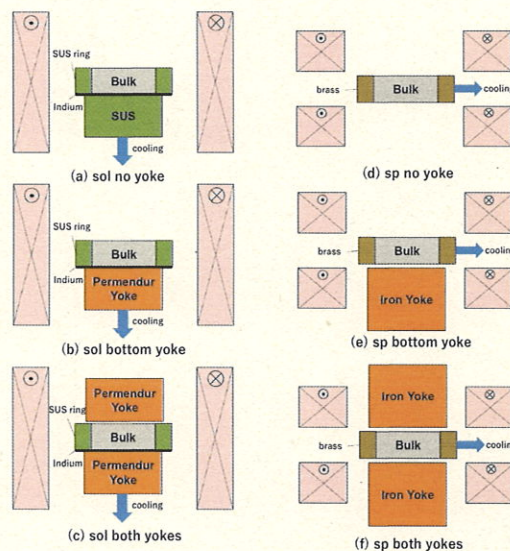


Fig. 2 コイル形状、ヨーク配置の異なる装置概略図



= 3 ~ 7 T での解析を行った。

### 3. Experimental method

実験では、Fig. 2 (a)、(b)、(d)、(f) の 4 パターンにおいて実験を行った。(a)、(b) はバルク底面方向、(d)、(f) はバルク側面方向から伝導冷却により初期温度  $T_s = 65$  K まで冷却した後、パルス磁場を印加した。捕捉磁場はバルク表面中心、右部、下部の 3 か所においてホールセンサを用いて測定した。温度は SUS リング側面あるいは brass 側面において cernox 温度計を用いて測定した。

### 4. Results and discussion

Fig. 3 に (a) solenoid coil、(b) split coil を用いたバルク表面中心におけるヨーク配置の異なる捕捉磁場の印加磁場依存性のシミュレーション結果を示す。Fig. 4 (a)、(b) とともに、ある印加磁場  $B_{ex}$  においてピークを迎え、その後減少している。また、no yoke と bottom yoke の最大捕捉磁場は 2.5 T 近傍であるのに対して、both yokes は 3.5 T 前後となっている。Both yokes において捕捉磁場が大きくなったのは、測定点近傍の yoke に磁束が引き付けられたためと考えられる。以上より、solenoid coil 装置と split coil 装置のパルス着磁特性はヨーク配置が大きく影響しており、バルクの片面のみにヨークを配置するよりも両側に配置する方が捕捉磁場が向上することがわかる。

Fig. 4 に  $T_s = 65$  K における捕捉磁場  $B_T$  の印加磁場依存性の実験結果を示す。最大捕捉磁場は sol bottom yoke が 1.01 T、sol no yoke が 1.16 T と差は大きくないが、sp both yokes は 1.88 T、sp no yoke は 1.30 T と差が大きくなった。これは、solenoid coil はヨークをバルク底面のみに配置しているのに対し、split coil ではバルク上下面に配置しているためと考えられる。実験からもコイル形状より、ヨーク配置が捕捉磁場に与える影響は大きいことがわかる。

### 5. Conclusion

本研究では、パルス着磁におけるコイル形状やヨーク配置の異なる超電導バルクの捕捉磁場特性の違いを明らかにすることを目的として研究を行った。

シミュレーションおよび実験の結果から、捕捉磁場の違いはコイル形状ではなく主にヨーク配置の違いで生じることがわかった。特に、磁束はヨークに引き付けられるため、ヨークをバルクの上下に配置するとよい。

### 6. Reference

- [1] M. D. Anslie *et al.* : Supercond. Sci. Technol., vol. 29, 074003
- [2] H. Fujishiro and S. Kobayashi : IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 12, 1124-1127

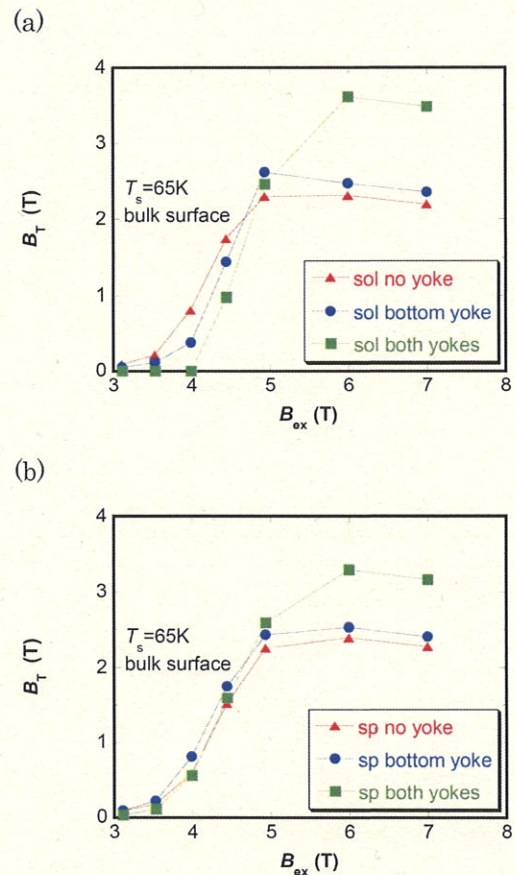


Fig. 3 (a) solenoid coil、(b) split coil のモデルにおける捕捉磁場の印加磁場依存性

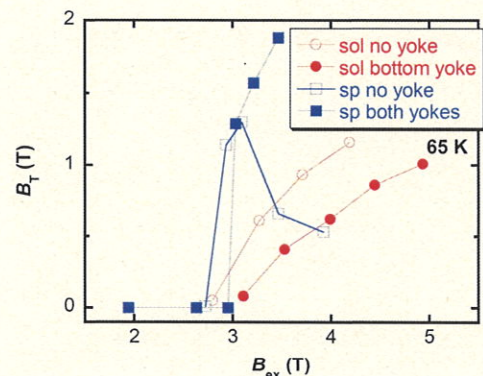


Fig. 4  $T_s = 65$  K における捕捉磁場  $B_T$  の印加磁場依存性