

# スプリットコイルを用いた超電導バルクのパルス着磁特性

平成 26 年度入学 藤代・内藤研究室 20214054 平野達也

## 1. Introduction

バルク超電導体は転移温度  $T_c$  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数テスラ級の強力な磁場発生源として利用することができる。これは超電導バルク磁石と呼ばれ、超電導モータやフライホイールなどへ応用する検討がなされている。一般的な着磁方法として、超電導マグネットにより静磁場を印加する磁場中冷却着磁(FCM)が知られているが、銅コイルによりパルス磁場を印加するパルス着磁(PFM)では、小型かつ安価な装置により着磁を行うことができるため、バルク応用に適しているとされる。しかし、この PFM では急激な磁束運動に伴う発熱により捕捉磁場が低下するという問題があり、捕捉磁場の向上が求められている。

ソレノイドコイルを用いてパルス磁場を数回印加するマルチパルス着磁を行い、比較的低磁場で磁束がバルク中心まで侵入する Flux Jump の発生と温度上昇の抑制により、PFM で 5.2 T の最高捕捉磁場を達成している[1]。近年、スプリットコイルによる PFM はソレノイドコイルと比較して Flux Jump の発生と冷却方向の違いによる冷却効率の向上により、捕捉磁場が向上することが知られている[2]。本研究では GdBaCuO バルクに対してスプリットコイルを用いたマルチパルス着磁を行い、磁束運動と温度上昇の両面から捕捉磁場向上の可能性を検討した。

## 2. Experimental Setup

試料として GdBaCuO バルク(直径 41 mm、厚さ 12 mm)を用いた。着磁コイルはスプリットコイル(内径 72 mm、外径 124 mm、高さ 35 mm)を用い、ヨーク(直径 60 mm、高さ 65 mm)を試料の上下に配置した。シングルパルス(SP)においては、伝導冷却により初期温度  $T_s = 65$  K、25 K まで冷却したバルクに対し、3.0 T ~ 5.5 T のパルス磁場を印加して着磁を行った。マルチパルス(MP)においては、1st パルスの初期温度  $T_{m1} = 65$  K とし、3.2 T の磁場を印加後、各 2nd パルスの初期温度  $T_{m2} = 65$  K、25 K まで冷却し、3.0 T ~ 5.5 T の磁場をそれぞれ印加した。着磁中の捕捉磁場をバルク表面中心において、捕捉磁場分布は着磁後にバルク表面 3 mm 上方においてホールセンサを走査することにより得た。また、温度測定はバルクを固定している真鍮製の治具上で、cernox 温度計により測定した。

## 3. Experimental Results

図 1 に 65 K、25 K における SP と MP によるバルク中心の捕捉磁場  $B_T$  の印加磁場  $B_{ex}$  依存性と捕捉磁場分布を示す。65 K において、印加磁場が比較的小さいとき(SP:  $B_{ex} < 3.5$  T, MP:  $B_{ex} < 4.0$  T) では、磁束がバルク中心まで侵入できず捕捉磁場は得られなかった。これは超電導状態となったバルクによる磁束の遮蔽効果のためだと考えられる。このときの捕捉磁場分布から不均一な断面の分布となることを確認できる。高印加磁場(SP:  $B_{ex} \geq 3.5$  T, MP:  $B_{ex} \geq 4.0$  T) では、磁束がバルク中心まで侵入した。ここで、最高捕捉磁場を得るための印加磁場を活性磁場  $B^*$  と定義する。MP における活性磁場は SP より大きく(SP:  $B^* = 3.8$  T, MP:  $B^* = 4.4$  T)、磁束をバルク中心まで侵入させるために、2nd パルスにおいて大きな印加磁場を要した。このときの捕捉磁場分布は円錐型となり、磁場分布はより真円に近づいている。SP、MP における最大捕捉磁場は同等の値が得られた(SP:  $B_T = 2.8$  T, MP:  $B_T = 2.6$  T)。一方、25 K において、SP と比較して MP による最高捕捉磁場は低下し(SP:  $B_T = 4.0$  T, MP:  $B_T = 3.3$  T)、印加磁

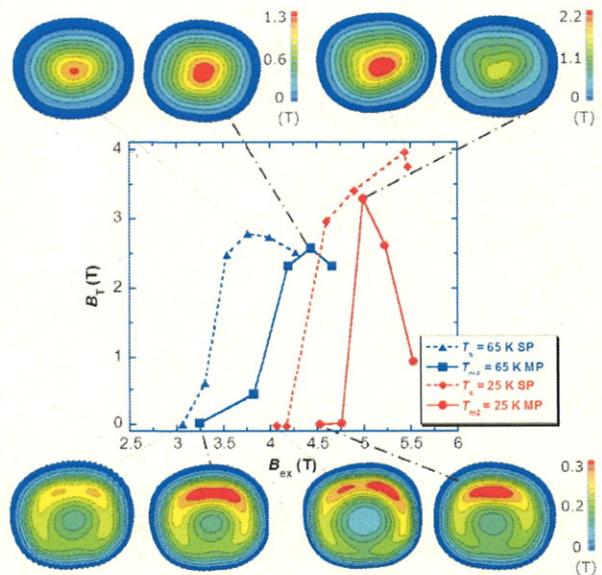


図 1 65 K、25 K における SP と MP による捕捉磁場  $B_T$  の印加磁場  $B_{ex}$  依存性と捕捉磁場分布

場の増加に伴って、捕捉磁場は急激に低下した。これは 65 K においては確認されず 25 K において現れる振る舞いであり、この温度での MP は効果的ではないと言える。

図 2 に SP と MP による最大温度上昇  $\Delta T_{\max}$  の印加磁場  $B_{\text{ex}}$  依存性を示す。65 K において MP による最大温度上昇は 0.5 ~ 1.0 K 低下し、25 K において 2.0 ~ 5.0 K 低下したことから、MP により最大温度上昇は抑制された。これはソレノイドコイルによる MP においても同様の結果が得られており、MP の特徴をスプリットコイルにおいても確認した[1]。

図 3 に 65 K における活性磁場  $B^*$  でのバルク表面中心の局所磁場  $B_z$  と印加磁場  $B_{\text{ex}}$  の時間依存性を示す。バルクによる磁束の遮蔽効果によって、局所磁場は印加磁場より遅れて立ち上がり、SP と比較して MP では印加磁場に対する磁束の侵入は低減した。これは 1st パルスにより捕捉された磁束により磁束侵入が抑制されたためと考えられる。

図 4 に 25 K における  $B_{\text{ex}} \approx 4.9$  T、5.5 T (SP:  $B^* = 5.4$  T、MP:  $B^* = 5.0$  T) でのバルク表面中心の局所磁場  $B_z$  と印加磁場  $B_{\text{ex}}$  の時間依存性を示す。 $B_{\text{ex}} \approx 4.9$  T では、(a)SP と (b)MP において同等の捕捉磁場を得た (SP:  $B_T = 3.4$  T、MP:  $B_T = 3.3$  T)。印加磁場の増加した  $B_{\text{ex}} \approx 5.5$  T では、(c)SP において捕捉磁場は向上した一方で、(d)MP において磁束の流出が顕著になり捕捉磁場は大きく低下した (SP:  $B_T = 4.0$  T、MP:  $B_T = 0.9$  T)。高温、高磁場において磁束流失が増大するために、捕捉磁場は低下することが知られている。この捕捉磁場の低下は MP による温度上昇の抑制 (SP:  $\Delta T_{\max} = 15.0$  K、MP:  $\Delta T_{\max} = 13.5$  K) に伴う磁束流失の低減では説明できず、高磁場に伴う磁束流失の増大だと考えられる。

以上から、ソレノイドコイルを用いた MP は温度上昇の抑制から捕捉磁場向上に効果的であるが[1]、スプリットコイルを用いた MP は 1st パルスにより捕捉された磁場に 2nd パルスによる磁束侵入が行われることで高磁場化し磁束流失が増大するため、捕捉磁場向上に効果的ではないと言える。

#### 4. Conclusion

本研究では GdBaCuO バルクに対してスプリットコイルを用いたマルチパルス着磁を行い、磁束運動と温度上昇の両面から捕捉磁場向上の可能性を検討した。

実験結果より、65 K におけるマルチパルスでは、より真円の磁場分布を確認でき、捕捉磁場はシングルパルスと同等となった。25 K におけるマルチパルスでは 1st パルスにより捕捉された磁場に、スプリットコイルによる磁束侵入が行われることで、高磁場化し、磁束流失が顕著になり捕捉磁場は低下した。よって、スプリットコイルを用いたマルチパルス着磁による捕捉磁場は 65 K においてシングルパルスと同等であり、特に 25 K において捕捉磁場向上に効果的ではないことを実験的に明らかとした。

#### 5. References

- [1] H. Fujishiro *et al.*, *Physica C*, vol. **445-448**, pp. 334-338, (2006)
- [2] M. D. Ainslie *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.*, vol. **29**, pp. 16, (2016)

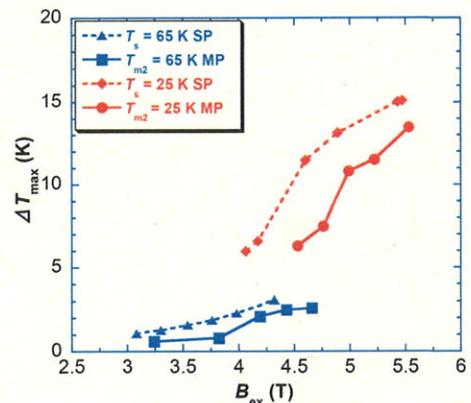


図 2 65 K、25 K における SP と MP による最大温度上昇  $\Delta T_{\max}$  の印加磁場  $B_{\text{ex}}$  依存性

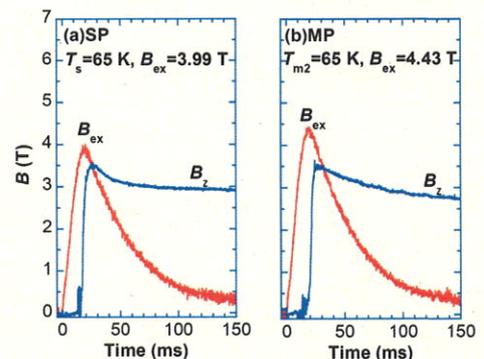


図 3 65 K における (a)SP と (b)MP による活性磁場  $B^*$  での局所磁場  $B_z$  と印加磁場  $B_{\text{ex}}$  の時間依存性

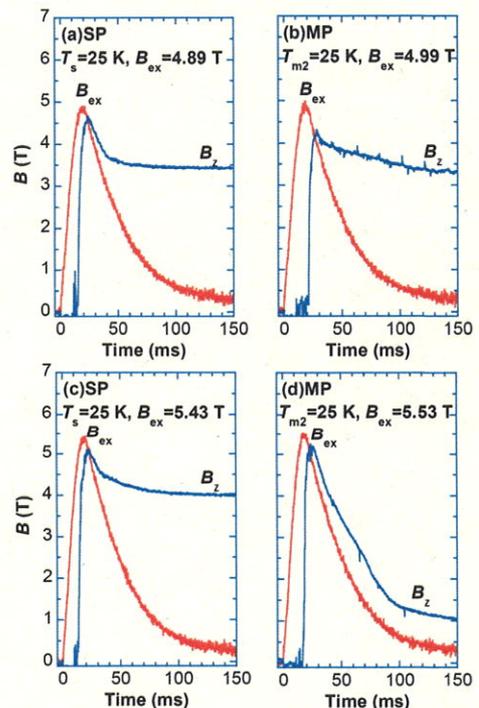


図 4 25 K における  $B_{\text{ex}} \approx 4.9$  T での (a)SP、(b)MP、 $B_{\text{ex}} \approx 5.5$  T での (c)SP、(d)MP による局所磁場  $B_z$  と印加磁場  $B_{\text{ex}}$  の時間依存性