

# 超電導バルクのパルス着磁における磁束ダイナミクスに関する研究

藤代・内藤研究室 G0318132 平野達也

## 1. Introduction

超電導バルクはセンチメートルサイズの超電導物質の塊である。磁束ピン止め効果を利用することで、超電導バルクはコンパクトで強力な磁場発生源として応用が期待されている。パルス着磁 (PFM: Pulsed-field magnetization) 法は、簡易な装置で短時間での着磁を可能とする。MgB<sub>2</sub>はREBaCuO (RE: Yまたは希土類元素) と比べて、軽量 (MgB<sub>2</sub>およびYBaCuOの理論密度はそれぞれ、2.62および6.3 g/cm<sup>3</sup>) で、レアアースフリーなために応用に適したバルク材料であるといえる。しかしながら、PFMを用いたMgB<sub>2</sub>バルクの捕捉磁場 (MgB<sub>2</sub>およびGdBaCuOの最高捕捉磁場はそれぞれ、1.1 T (@13 K)[1] および 5.2 T (@29 K)[2]) は低く、その向上が求められている。これに対して、軟磁性 yoke のバルク上下面への配置 [3] やパルス磁場を複数回印加するマルチパルス着磁法 [2] が有効な手法であると報告されている。

本研究では、軟鉄 yoke を挿入した積層 MgB<sub>2</sub> リングバルクに 2 段階パルス着磁を適用し、捕捉磁場の向上を試みた。得られた捕捉磁場特性から軟鉄 yoke の存在と 2 段階パルス着磁が磁束運動に与える影響と着磁メカニズムを明らかとする。

## 2. Experimental

浸透法で作製した MgB<sub>2</sub> バルク (外径 60 mm、内径 20 mm、高さ 9 mm) と無酸素銅の板 (外径 60 mm、内径 20 mm、高さ 0.5 mm) を Figure 1(a) のように積層させた。また、Figure 1(b) のように軟鉄 yoke をリングバルク内に挿入した。これらをそれぞれ、with yoke、without yoke と呼ぶ。着磁コイルとしてスプリットコイルを用いて PFM を行った。パルス着磁条件 (着磁温度、印加磁場) を Figure 2 に示す。Single-pulse となる Figure 2(a) では、着磁温度  $T_s = 20$  K に冷却し、最大磁場 0.5~2.0 T のパルス磁場を印加した。Double-pulse となる Figure 2(b) では、着磁温度  $T_{s1} = 20$  K に冷却し、 $B_{ex1} = 1.20$  T、または 1.32 T のパルス磁場を印加後、 $T_{s2} = 20$  K に冷却し、再度 0.5~2.0 T を印加した。着磁中の捕捉磁場はバルク表面 ( $r = 0, 20, 40$  mm) で、ホールセンサにより測定した。また、温度はバルクを固定しているジグ上で、セルノックス温度計により測定した。着磁後の磁場分布はバルク表面 5 mm 上方でホールセンサを走査させ測定した。

## 3. Results and discussion

Figure 3 に、yoke の有無による捕捉磁場  $B_t$  の印加磁場  $B_{ex}$  依存性を示す。最大捕捉磁場  $B_{t,max}$  は、without yoke および with yoke でそれぞれ、0.44 T (@ $B_{ex} = 1.23$  T) および 0.81 T (@ $B_{ex} = 1.48$  T) となった。with yoke の捕捉磁場分布は、without yoke と比較して yoke 上面で磁場が上昇しており、yoke の比透磁率が周囲と比較して高いために磁場が収束したためだと考えられる。

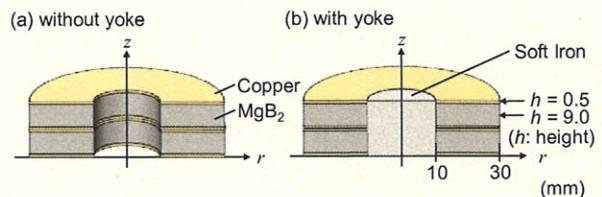


Figure 1 着磁試料の模式図 (a) without yoke, (b) with yoke

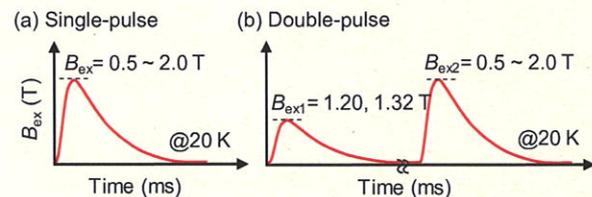


Figure 2 パルス着磁条件 (着磁温度、印加磁場) (a) Single-pulse, (b) double-pulse

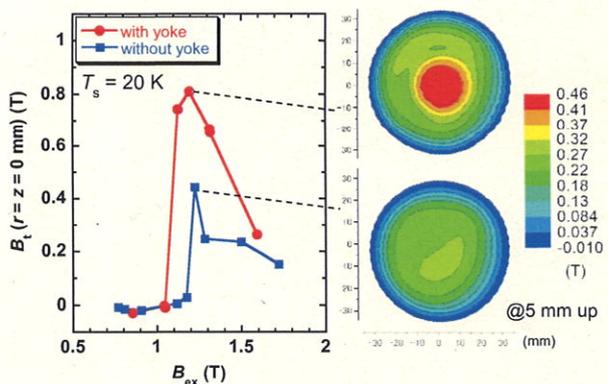


Figure 3 yoke の有無による捕捉磁場  $B_t$  の印加磁場  $B_{ex}$  依存性と最大捕捉磁場分布

Figure 4 に、Single-pulse による捕捉磁場  $B_t$  の時間依存性 (a) without yoke, (b) with yoke を示す。with yoke と without yoke において  $B_{ex} \leq 1.12$  T では、捕捉磁場  $B_t$  は増大しなかった。これは、磁場遮蔽効果で磁束がバルク中心まで侵入できなかったためである。印加磁場の増大した  $B_{ex} \sim 1.2$  T では、侵入磁場  $B_{in}$  は増大し、磁束はバルク中心まで到達した。ここで、 $B_{in}$  は着磁中の最大の磁場である。with yoke は without yoke と比較して、大きな侵入磁場が得られたことで、捕捉磁場は向上した。さらに印加磁場の増大した  $B_{ex} \geq 1.3$  T では、侵入磁場  $B_{in}$  が増大した一方で、磁束流失  $\Delta B (=B_{in} - B_t)$  も増大した。ここで、 $\Delta B$  は侵入磁場  $B_{in}$  と捕捉磁場  $B_t$  の差分である。高印加磁場では磁束流失の増大で、捕捉磁場は減少した。

yoke が着磁中の磁束運動に与える影響を明らかにするために、各位置 ( $r = 0, 20, 40$  mm) での着磁中の磁場を測定した。Figure 5 に Single-pulse による各位置での磁場の時間依存性 (a) without yoke, (b) with yoke を示す。ジグ上 ( $r = 40$  mm) での磁場は、with yoke と without yoke において同様の振る舞いとなり、yoke の影響を受けないことがわかった。バルク上 ( $r = 20$  mm) の捕捉磁場  $B_t$  ( $t = 500$  ms) は、without yoke および with yoke でそれぞれ、 $0.18$  T ( $@B_{ex} = 1.23$  T) および  $0.51$  T ( $@B_{ex} = 1.20$  T) となった。これから、yoke はバルクの捕捉磁場を向上させたと考えられる。

さらなる捕捉磁場の向上を目指し、2段階パルス着磁を適用した。Figure 6 に、1<sup>st</sup> pulse の異なる Double-pulse による捕捉磁場  $B_t$  の印加磁場  $B_{ex2}$  依存性と最大捕捉磁場分布を示す。 $B_{ex1} = 1.32$  T の 1<sup>st</sup> pulse を印加後、 $B_{ex2} = 1.26$  T の 2<sup>nd</sup> pulse を印加したとき、PFM を用いた  $MgB_2$  バルクの捕捉磁場  $B_t$  としては最高値となる  $1.61$  T を達成した。その際の捕捉磁場分布は、磁場が均一化していることがわかる。

#### 4. Conclusion

本研究では、捕捉磁場を向上させるために、軟鉄 yoke を挿入した  $MgB_2$  リングバルクに 2 段階パルス着磁を行った。軟鉄 yoke はバルク表面中心で磁場を収束させ、バルク上の捕捉磁場を向上させた。着磁温度  $T_s = 20$  K で 1<sup>st</sup> pulse ( $B_{ex1} = 1.32$  T) を印加した後に、2<sup>nd</sup> pulse ( $B_{ex2} = 1.26$  T) を印加することで、PFM を用いた  $MgB_2$  バルクの捕捉磁場としては最高値の  $B_{t,max} = 1.61$  T を達成した。

#### 参考文献

- [1] H. Fujishiro, H. Mochizuki, M. D. Ainslie and T. Naito *Supercond. Sci. Technol.*, **29** 084001 (2016)
- [2] H. Fujishiro, T. Tateiwa, A. Fujiwara, T. Oka and H. Hayashi *Physica C* **445-448** 334-338 (2006)
- [3] M. D. Ainslie *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.*, **29** 074003 (2016)

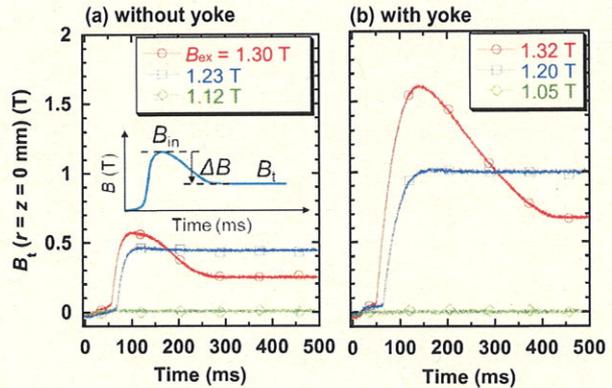


Figure 4 Single-pulse による捕捉磁場  $B_t$  の時間依存性 (a) without yoke, (b) with yoke

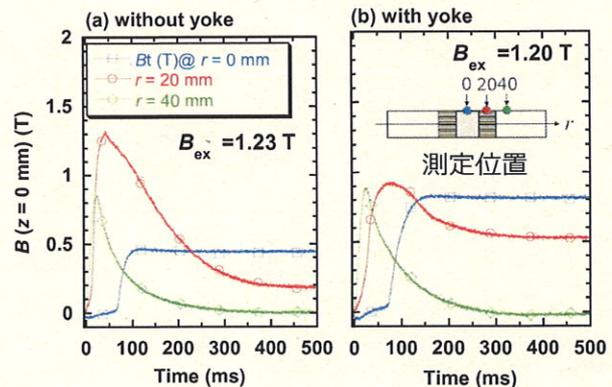


Figure 5 Single-pulse による各位置 ( $r = 0, 20, 40$  mm) での磁場の時間依存性 (a) without yoke, (b) with yoke

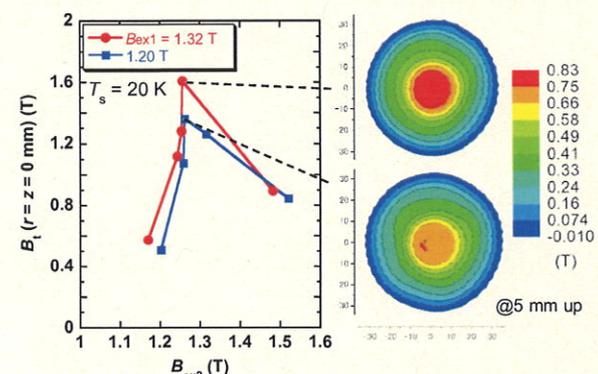


Figure 6 1<sup>st</sup> pulse の異なる Double-pulse による捕捉磁場  $B_t$  の印加磁場  $B_{ex2}$  依存性と最大磁場分布