

MMPSC 法による超伝導バルクの着磁現象と磁束運動

材料物性工学専攻 藤代研究室 立岩 達也

1. はじめに

超伝導バルク体の応用として、磁束ピンニング効果を利用した擬似永久磁石がある。この磁石は、急峻な磁場勾配などの特徴から磁気分離などの応用が期待されている。本研究室では、バルク体を磁化させる着磁法の一つであるパルス着磁法(PFM)の研究を行ってきた。PFMは装置が安価でありコンパクトであるため応用には不可欠な方法であるが、急激な磁束運動による発熱現象がバルク体の捕捉磁場を減少させる欠点があった。そこで、研究室ではPFMによる捕捉磁場向上を目指し、熱容量増加のためバルク体に金属リングを装着する方法や発熱現象と捕捉磁場の関係などについて研究した。その中で、バルク体の初期温度 T_S と印加磁場 B_{ex} を二段階に変化させるMMPSC法(Modified Multi-Pulse technique with Step-wise Cooling)を提案し、 $\phi 45\text{mm Gd BaCuO}$ バルク超伝導体にて捕捉磁場 $B_T=4.45\text{T}$ に成功した。これは当時の世界最高の $B_T=3.80\text{T}$ を超えた。本研究では、MMPSC法を用いて更なる捕捉磁場の向上を目指すことを目的とし、またMMPSC法のバルク内の磁束運動や着磁現象について系統的な考察を行った。

2. 実験方法

GdBaCuO 超伝導バルク体(直径 45 mm ,高さ 15 mm)は金属リング(SUS;厚さ 5 mm)を装着させ使用した。金属リングを装着している Gd 系バルクを set A、装着していない Gd 系バルクを set B とする。後述する Fig.1, Fig.2 の挿入図に Gd 系バルクの set A ,set B の捕捉磁場と温度の計測位置を示す。バルク表面には中心から周辺にかけて C,M,E の位置にホールセンサーを、T の位置に熱電対を貼り付け、局所的な捕捉磁場(B_L^C, B_L^M, B_L^E)、 T_S や温度上昇を計測した。各バルク体は上下に軟磁鉄を配置し、冷凍機を用いてバルク表面最低 $T_S=19\text{K}$ まで伝導冷却した。パルス磁場強度 B_{ex} はシャント抵抗にて較正し、最高 $B_{ex}=7.01\text{T}$ までを印加した。

着磁法は、SPA(同一パルス法)とMMPSC法を用いた。SPAは同じ強度のパルス磁場を複数回印加する着磁法である。また、SPAのNo.1 pulseをSP(単パルス)とする。Fig.1にMMPSC法の概略図を示す。MMPSC法とは、始め1st stageとして、比較的高温の初期温度 T_S^1 で比較的低磁場 B_{ex}^1 を2回印加する。着磁後、バルクを T_S^1 より低い温度 T_S^2 まで冷却し比較的高磁場 B_{ex}^2 を2回印加する。

3. 実験結果と考察

まず、金属リングのない set B における Gd 系バルクの基礎特性を示す。Fig.2(a),(b)に、 $T_S=43\text{K}, 19\text{K}$ のSPによる、Tの位置の最高温度上昇 ΔT_{max} と中心の捕捉磁場 B_L^C の印加磁場依存性を示す。 ΔT_{max} は、 $T_S=43\text{K}, 19\text{K}$ 両方で B_{ex} が増加するとともに増加する。これは B_{ex} が大きくなるほど磁束の運動が激しくなることで発熱も大きくなることによる。また、 $T_S=19\text{K}$ の ΔT_{max} は $T_S=43\text{K}$ の ΔT_{max} よりも大きい。これは、バルク体を低温にすることで、比熱小さくなり、またピンニング力が大きくなることで ΔT_{max} も大きくなる。 B_L^C は $T_S=43\text{K}, 19\text{K}$ 両方で、 B_{ex} の増加とともに単調増加し6T付近で最大値をとるが、その後減少した。これは4T以下ではバルク内に磁束が侵入できないが、印加磁場が増加するとともに徐々に侵入し B_L^C は最大値を示す。しかし、6T以上の高印加磁場では、発熱により B_L^C が減少する。 $T_S=19\text{K}$ において、 B_L^C の最大値は $T_S=43\text{K}$ よりも大きくなった。これは、低温化によってピンニング力が増大したためと思われる。set B,SPでの最高捕捉磁場は $B_L^C=3.70\text{T}$ であった。

これらの結果を踏まえMMPSC法を行った。Table.1に、set A ,set Bにおいて最大 B_L^C を記録したMMPSC法の T_S, B_{ex} を示す。Fig.3(a),(b)に、Table.1の条件で行ったset A ,set BのTの位置の ΔT_{max} と B_L^C に対するパルス回

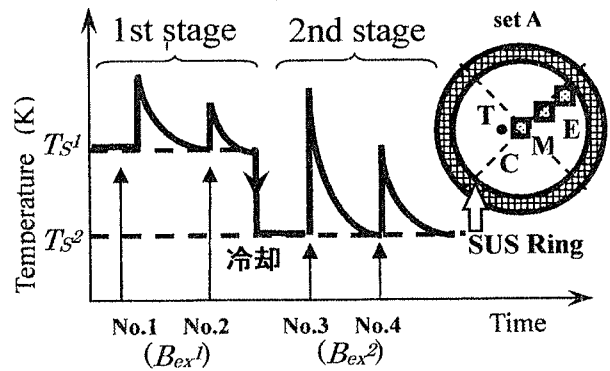


Fig.1 MMPSC法の概略図

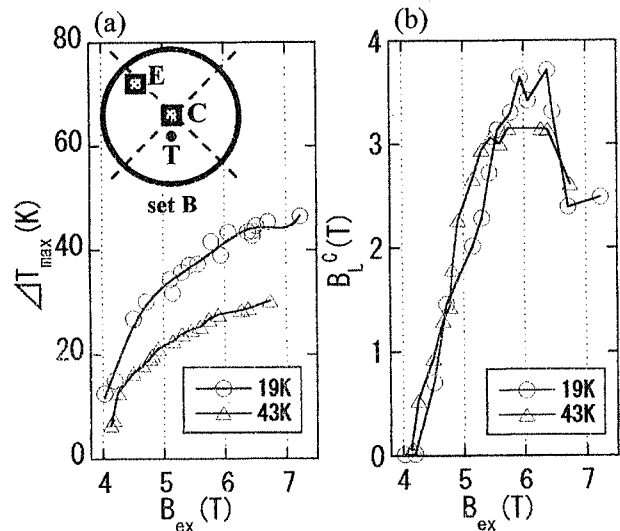


Fig.2(a),(b) $T_S=43\text{K}, 19\text{K}$ のSPによるset Bの ΔT_{max} と B_L^C の印加磁場依存性

Table.1 set A, set Bでの B_L^C 最大のMMPSC法の T_S, B_{ex}

	1st stage $B_{ex}^1(T_S^1)$	2nd stage $B_{ex}^2(T_S^2)$
set A	4.80T(47K)	6.73T(28K)
set B	4.54T(45K)	6.72T(29K)

数依存性を示す。 ΔT_{max} は、全体的に set A の方が小さいことが分かる。これは、金属リング装着によりバルク体の熱容量が増加し、バルク体の発熱量が少なくなったことによると思われる。 B_L^C において、set A は 1st stage で set B と同じぐらいの捕捉磁場だったが、No.3 pulse で $B_L^C=5.12\text{T}$ 、最終的に No.4 pulse で $B_L^C=5.20\text{T}$ まで増加した。set B の B_L^C と比較すると明らかに大きく、捕捉磁場は向上した。これは、バルク体内の温度上昇が低くなることで、set B よりも大きい捕捉磁場が得られたと思われる。Fig.5(a),(b)に set A 及び set B の No.3 pulse における局所磁場 B_L^C, B_L^E, B_L^M と印加磁場 $\mu_0 H_a$ の時間依存性を示す。No.3 pulse の B_{ex}^2 の大きさはほぼ同じだが、 B_L^C において set A は約 6T まで磁束が侵入しているのに対し、set B では 5.3T までの磁束の侵入だった。その後、印加磁場が減少するにつれて、 B_L^C も減少していくが、set A においてあまり減少せず 5T 付近で減少が止まるが、set B においては、大きく減少し 150ms では set A の半分ほどとなった。この磁束の減少は Fig.3 で示した温度上昇によって、バルク体内のピンニング力が減少したことによると思われる。従って、金属リング装着によって捕捉磁場が向上し、 $B_L^C=5.20\text{T}$ に成功した。

次に、MMPSC 法の着磁現象を系統的な考察を行う。Table.1 の着磁条件の 1st stage の B_{ex}^1 のみ変化させた実験を set B で、2nd stage の B_{ex}^2 のみ変化させた実験を set A で行った。まず、set B での B_{ex}^1 依存性について考察する。Fig.6 に、 B_{ex}^1 を変化させた MMPSC 法の No.1~No.4 pulse 印加後の B_L^C, B_L^E の場所依存性について示す。各捕捉磁場はバルク中心から対称であると仮定した。比較として $B_{ex}=6.6\text{T}$ の SPA の結果を載せる。1st stage において B_{ex}^1 が低いと B_L^E も低くなっていることが分かる。磁束は周辺部から侵入し、 B_{ex} 大きくなるとバルク中央に侵入できることによる。また、 B_{ex}^1 がほぼ同じ場合でも B_L^E は変化していることが分かる。2nd stage において比較をすると、比較的 B_L^E が大きく捕捉できているほど最終的の捕捉磁場が向上していることが分かる。しかし、SPA(6.6T)のように中央まで磁束が捕捉されていると捕捉磁場の向上は見込めない。従って、1st stage において、中心部が小さく周辺部に大きい磁束が捕捉される M 字のような捕捉磁場分布(M字型)よって、2nd stage で捕捉磁場が向上すると思われる。次に、set A での B_{ex}^2 依存性について考察する。Fig.7 に、 B_{ex}^2 を変化させた MMPSC 法の No.2, No.3 pulse 印加後の B_L^C, B_L^M, B_L^E の場所依存性について示す。各捕捉磁場はバルク中心から対称であると仮定した。1st stage の捕捉磁場をできるだけ同じ条件にし、 B_{ex}^2 を変化させたところ、 $B_{ex}^2=7.01\text{T}$ では中心部の捕捉磁場が少し向上した。 $B_{ex}^2=6.04\text{T}$ では、バルク全体において捕捉磁場の向上が見られるが、最適な $B_{ex}^2=6.73\text{T}$ よりも小さい結果となった。 B_{ex}^2 において、最適な大きさがあることが分かる。

4. 結論

今回、MMPSC 法による捕捉磁場向上と系統的な考察を行い、 $B_L^C=5.20\text{T}$ を実現した。また、MMPSC 法には 1st stage, 2nd stage において最適な捕捉磁場分布 (M字型)、印加磁場の大きさがあることがわかった。

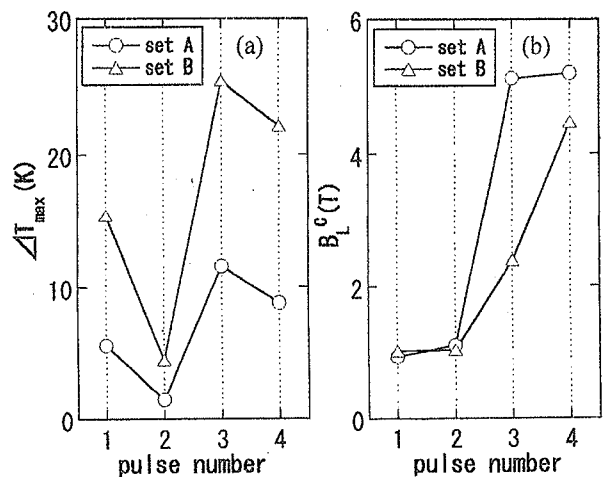


Fig.4(a),(b) Table.1 の条件での set A, set B の ΔT_{max} と B_L^C に対するパルス回数依存性

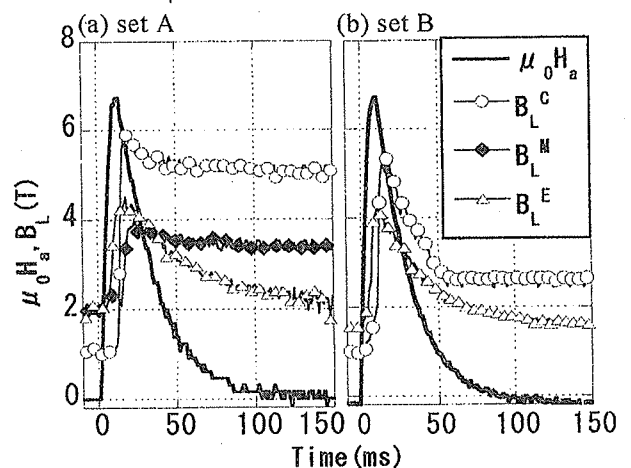


Fig.5(a),(b) set A, set B の No.3 pulse における B_L^C, B_L^M, B_L^E と印加磁場 $\mu_0 H_a$ の時間依存性

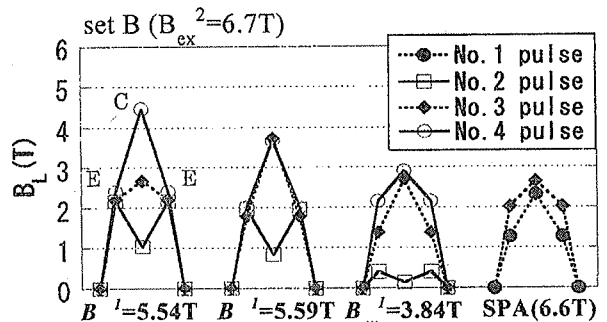


Fig.6 set B の No.1~No.4 pulse における B_L^C, B_L^E の場所依存性

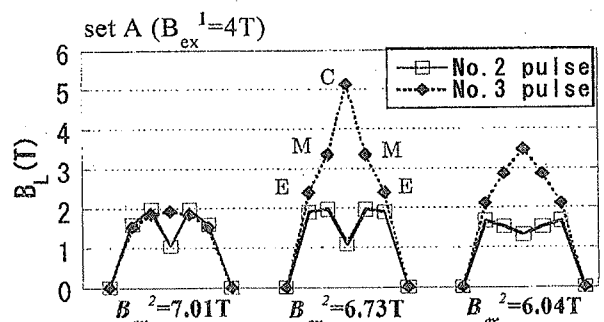


Fig.7 set A の No.2, No.3 pulse における B_L^C, B_L^M, B_L^E の場所依存性