

バルク超伝導体のパルス着磁による捕捉磁場と発熱解析

電子物性学講座 池部研究室 金山 雅彦

1.はじめに

超伝導バルク体の超強力磁石としての応用・実用化を目指す際に、安価でコンパクトなパルス着磁 (PFM) は重要な技術である。しかし一般的に磁場中冷却着磁 (FCM) に比べ PFM では、77K 以下で半分程度の捕捉磁場 B_T しか達成できない。その理由は磁束が超伝導体中を運動することによって生じる発熱が温度上昇となって超伝導体のピンニング力を低下させることにあり、一般的にピンニング損失、粘性力損失と呼ばれている。低い B_T の原因がこれらの発熱によって生じる温度上昇であることは一般的に知られているが、これまで詳細な実験データは存在しなかった。これまでバルクの初期温度を 40K として PFM における温度上昇 ΔT を実験的に測定し、捕捉磁場 B_T との関係について明らかにしてきた。さらに低温にすれば、臨界電流密度 J_c の向上によりピンニング力が增大するため捕捉磁場が向上すると考えられる。

本研究では 20K まで冷却したバルク体へのパルス着磁を行い、温度上昇と捕捉磁場の関係を検討し、捕捉磁場向上の可能性を探った。また温度上昇から発熱量を算出し、ピンニング損失・粘性損失別に考察することで磁束の捕捉特性を詳細にすることを目的とする。

2.実験方法

図 1 に実験装置のセットアップを示す。熔融法で作製した Sm 系超伝導バルク体 ($\phi=45\text{mm}, h=15\text{mm}$; 同和鉱業製) を上・下面の樹脂含浸を取り除き, GM 冷凍機のコールドステージに固定した。温度測定のための熱電対はバルク中央に 1 箇所 [T1]、Growth Sector Boundary (GSB) に囲まれた領域の 4 箇所 [T2-T5] の計 5 箇所に貼り付けた。さらに、T1 横のホールセンサーで捕捉磁場 B_T^P を測定した。

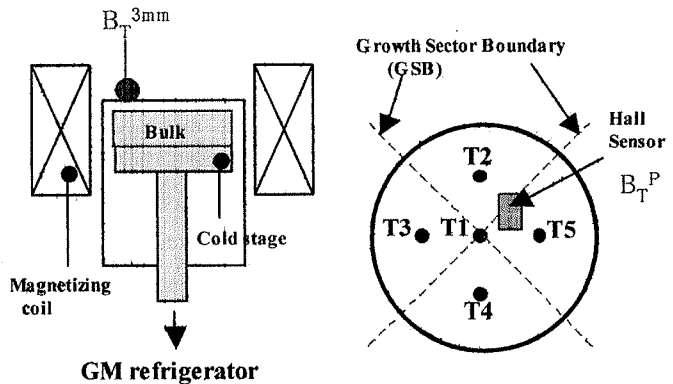


Fig.1 装置のセットアップと熱電対のポジション

バルク体を 20K、30K、40K に冷却した後、 $B_{ex}=3.83\sim 6.04\text{T}$ のパルス磁場(立ち上がり時間: 12ms)を各 5 発繰り返して印加(以下、No.1~No.5)し、それぞれの $T(t)$ 、 B_T^P を測定した。また、デジタルオシロスコープによって PFM 中の印加磁場 $\mu_0 H_a$ と局所的な磁場 B_T の時間依存性も測定した。パルス印加後、磁場分布(バルク表面 3mm 上部)の測定も行った。

3.実験結果

図 2 および図 3 に各温度における No.1 pulse 印加時の最大温度上昇 ΔT_{max} および総磁束量 Φ_T の印加磁場依存性を示す。 ΔT_{max} はバルク周辺部(T2~T5)の平均である。図 2 より、印加磁場の増加と共に ΔT_{max} は大きくなる。これは、高磁場側ほどバルク体内で磁束の運動が激しいことを表している。また、低温になるほど比熱が小さくなるため ΔT_{max} は大きくなり、高磁場側ほど $T_s=40\text{K}$ との差が大きくなる。20K における最大温度上昇は $B_{ex}=6.04\text{T}$ で約 43K にもなる。

一方、図 3 において、低磁場(3.83T)では温度が高いほど総磁束量は大きい、高磁場(5.53T 以上)では逆に温度が低いほど総磁束量は大きいことが分かる。これは低温化によってバルクの J_c が向上し、ピンニング力が增大したためである。低磁場ではピンニング力が強すぎて、中心まで十分に磁束が侵入できなかったため、20K の結果は 40K よりも下回っている。しかし、高磁場に

なり 20K でも十分に磁化されるとピンニング力が強い 20K の方がより多くの磁束を捕捉することができるため、Fig.3 のような結果になる。また、同じ高磁場でも $B_{ex}=6.04T$ では磁束の運動が激しく、温度上昇が大きすぎて J_0 が低下し、総磁束量が減少する結果となった。

これらの結果をさらに厳密に考察するために、PFM 中の局所的な磁化過程を次式のように観察した。

$$M = B_T - \mu_0 H_a \quad (1)$$

M は磁化、 B_T と $\mu_0 H_a$ はデジタルオシロスコープで観察した捕捉磁場と印加磁場である。(1)式で描くことができる磁化曲線でのヒステリシス損失は、着磁過程に伴うエネルギー損失ということでピンニング損失と考えることができる。

Fig.4 に上記のように算出したピンニング損失の印加磁場依存性を示す。挿入図として(1)式から得られる磁化曲線を示す。 $T_s=20K$ で $B_{ex}=5.53T$ 印加中のものである。ゼロ磁場冷却(ZFC)ではバルク体の中心まで磁束が侵入することができないために終始、ほぼ完全反磁性の振る舞いを示す。磁化曲線の励磁過程では ZFC と同様に完全反磁性を示すがピーク磁場に近づくにつれて徐々に磁束が中に侵入し始める。磁束の侵入に伴い、磁化はプラスに転じ、最終的な磁化の値が捕捉磁場となる。

ピンニング損失は印加磁場の増大と共に大きくなる。20K に比べて低磁場では 40K の方が大きくなる。逆に高磁場になると 20K の方が大きくなり、Fig.3 と非常に類似した振る舞いをもつことがわかる。ピンニング力増大の影響が高磁場側において大きく、総磁束量の向上につながっていることを示している。

4.結論

低温における温度上昇と捕捉磁場の関係を明らかにし、捕捉磁場向上の可能性を考察した。その結果、低温では比熱の減少により温度上昇は大きくなるが、ピンニング力の効果が大きいため捕捉磁場は向上した。ただし、高ピンニング力となる 20K で低磁場を印加しても磁束がバルク体内に侵入できないため捕捉磁場は小さい。より高磁場での PFM が有効である。なお、低温で温度上昇を抑制しながら高磁場の PFM を行うことによって、最高で 4.19T の捕捉磁場が得られることを確認している。

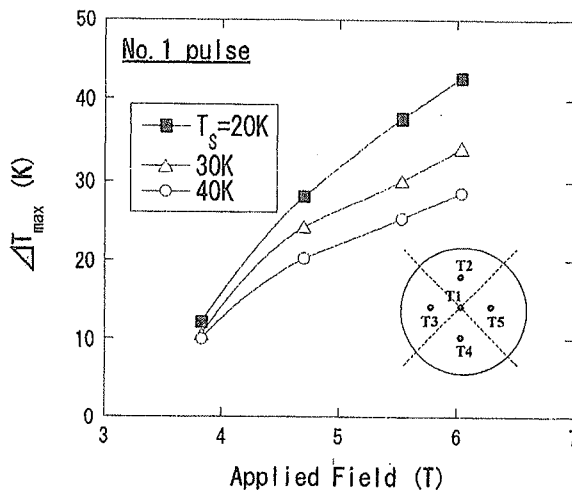


Fig.2 No.1 pulse における ΔT_{max} の印加磁場依存性

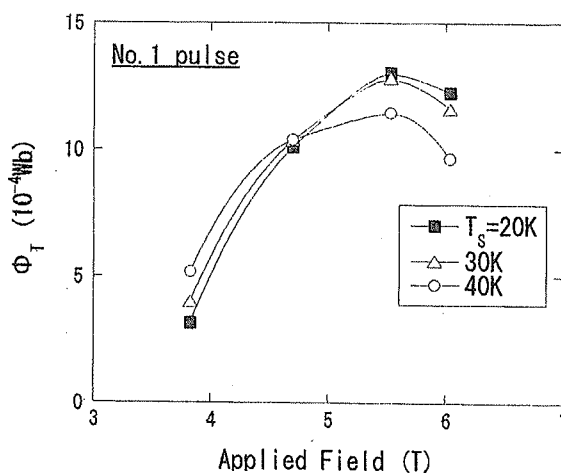


Fig.3 No.1 pulse における Φ_T の印加磁場依存性

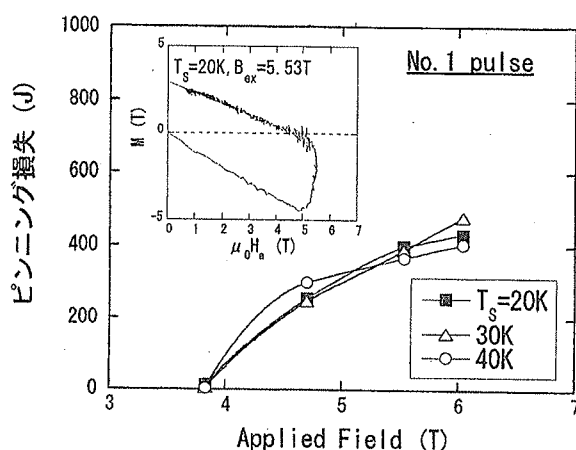


Fig.4 ピンニング損失の印加磁場依存性
(挿入図 ; $T_s=20K, B_{ex}=5.53T$ 印加時の磁化曲線)