

MgB₂バルク超伝導体の磁束ピンニング特性に関する研究

Flux pinning properties in MgB₂ bulks

九工大・情報工 木内 勝
 東大・工 山本 明保
 東北大・金研 淡路 智

M. Kiuchi¹, A. Yamamoto² and S. Awaji³

¹Department of Computer Science and Electronics, Kyushu Institute of Technology

²Department of Applied Chemistry, University of Tokyo

³Institute for Materials Research, Tohoku University

1. はじめに

MgB₂は金属超伝導体の中でも40 K程度と最も高い臨界温度 T_c を持ち、更に酸化物超伝導体のような結晶粒間での臨界電流密度 J_c の劣化が少ないことがよく知られている。また、原材料の価格が低いことも MgB₂ の大きな利点であり、線材を用いた様々な応用への利用が期待されている[1,2]。線材加工として、Mg と B の混合粉末を用いる *in-site* 法と MgB₂ の化合物粉末を用いる *ex-site* 法の2つの方法があるが、これらの手法からまだ十分な臨界電流密度 J_c が得られていない。このような特性となるのは MgB₂ の低い充填率と、結晶界面に存在する酸化膜によるもので[3,4]、充填率の向上や酸化膜の除去するための様々な手法が検討されている。

一方で MgB₂ での主要なピンは結晶粒界であることから、結晶の粒径の微細化や、添加による結晶の歪の導入などの様々な手法も試みられている。但し、この結晶界面ピンは要素的ピン力の強化ばかりでなく、上部臨界磁界 B_{c2} の増加に伴う不可逆磁界 B_i の向上の影響も含まれる。更に、MgB₂ はマルチギャップ超伝導体であることから、磁束ピンニングを決定する重要なパラメータである上部臨界磁界 B_{c2} がその影響を受ける可能性がある[5]。したがって、今後の更なる特性改善のためにも、 J_c の決定機構の解明が必要である。

本研究は、低温生成及び不純物添加した MgB₂ バルクに注目し、広い温度領域の臨界電流密度 J_c 及び上部臨界磁界 B_{c2} を測定し、MgB₂ の磁束ピンニング機構について調べた。

2. 測定

測定に用いた試料は MgB₂ の熱処理としては低い600°Cの低温生成と、C添加としてB₄C及びSiCを加えた3つのMgB₂バルク体で、いずれもPICT法[6]で作製した。熱処理後SUSシーシ材をMgB₂から剥離し、磁化法におよそ1.5 mm × 1.5 mm × 0.5 mm、

通電評価ではおよそ3 mm × 0.6 mm × 6 mmに整形した。仕込み組成、焼成条件及び臨界温度 T_c を Table 1 に示す。

臨界電流密度 J_c は東北大学強磁場超伝導材料研究センターの18T-SMと組み合わせた引き抜き法磁化測定装置を用いて、4.2 ~ 28 K、-5 ~ 15 Tの範囲の直流磁化から求めた。また、不可逆磁界 B_i はピン力密度 F_p がゼロとなる磁界で定義した。

また上部臨界磁界 B_{c2} を評価するために、直流四端子法を用いて磁場中の抵抗率の温度依存性を測定した。上部臨界磁界 B_{c2} は40 Kの抵抗率の90%となる温度及び磁界で定義した。更に不可逆磁界 B_i' を40 Kの抵抗率の10%となる温度及び磁界で定義した。

3. 結果及び検討

Fig. 1 に#3のピン力密度 F_p の温度スケール則を示す。特に高温領域のピン力密度 F_p はこの結晶界面ピンニングの磁界依存性で説明できることが報告されており[7]、今回の測定でも同様な結果となった。一方で温度の低下と共にピン力密度の最大値 F_{pmax} が低磁界側に移動し、全体の磁束ピンニング特性も

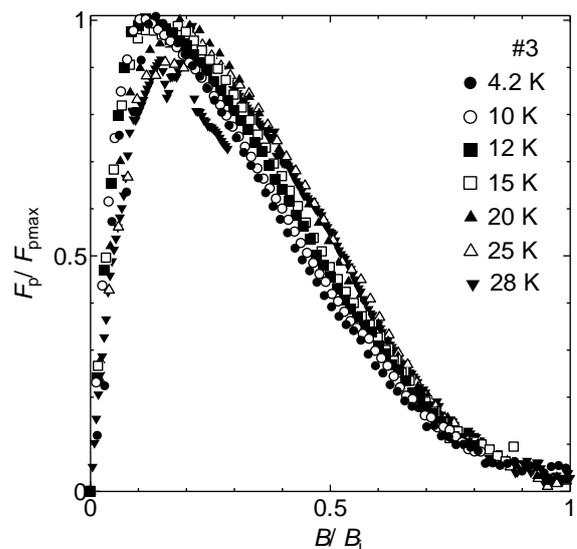


Fig. 1 Scaling law of the pinning force density of specimens #2.

Table 1: Specifications of specimens

	仕込み組成	焼成条件	臨界温度 T_c [K]
#2	MgB ₂	600°C, 24h	38.2
#3	MgB _{1.50} (B ₄ C) _{0.10}	850°C, 3h	35.4
#4	MgB _{1.80} (SiC) _{0.20}	850°C, 3h	35.5

ユニバーサルな曲線からはずれることがわかる。このような振る舞いは、3つの試料で共通で20 K 近傍を境に生じる。特に今回用いた試料では、#4 がより大きくはずれた。これは高温領域と低温領域での磁束ピンニング機構が異なることを示している。

Fig. 2 にピン力密度 F_p がゼロとなる磁界で定義した不可逆磁界 B_i の温度依存性を示す。#2 の 600°C 熱処理試料に比べて、C 添加の #3 と #4 の B_i が高いことわかる。更に、C 添加でも #3 と #4 の温度依存性が多少異なり、高温領域では #4 の方が大きい、 $T/T_c = 0.5$ (およそ 20 K) 近傍から #3 の方が大きくなる。

Fig. 3 にピン力密度の最大値 F_{pmax} と不可逆磁界 B_i の関係を示す。点線は高温領域の依存性で $F_{pmax} \propto B_i^2$ の関係を表す。20 K 近傍を境に高温領域と低温領域でその依存性が大きく変化して、磁束ピンニング機構が変化していることがわかる。この傾向は熱処理や C 添加試料でもほとんど同様な振る舞い

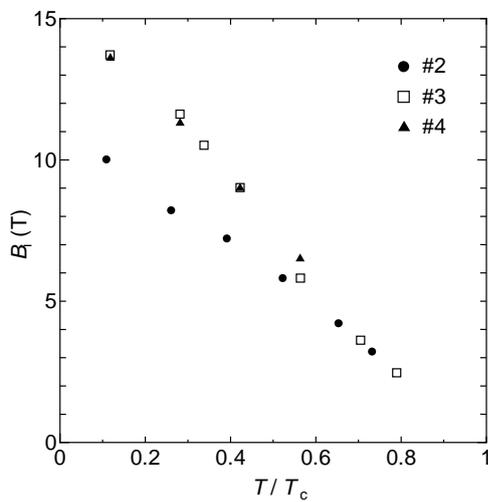


Fig. 2 Temperature dependence of the irreversibility field B_i .

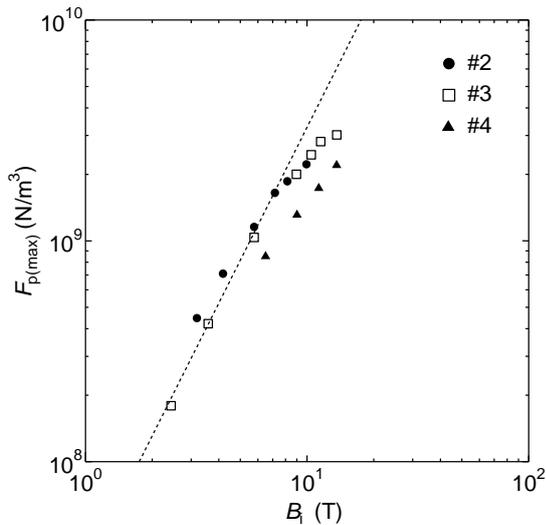


Fig. 3 Relationship between the maximum pinning force density $F_{p(max)}$ and the irreversibility field B_i .

となる。一般的に、温度の低下と共にコヒーレンス長が減少することにより、磁束線がピン止め効率がよりよい点状ピン等へ変化することによりその依存性が変化する可能性があるが、その場合は、ピン力密度の最大値 F_{pmax} と不可逆磁界 B_i の両方の特性向上が予想される。しかし今回の実験結果は、ピン力密度の最大値 F_{pmax} の増加に比べて不可逆磁界 B_i の増加が大きくなっており、簡単に温度低下による主要なピンの変化によるものではない可能性がある。

そこで、このようなピン力密度の変化を調べるために不可逆磁界 B_i の決定で重要なパラメータである、上部臨界磁界 B_{c2} を特にピン力密度の温度スケール側のはずれが大きい C 添加した試料について評価した。Fig. 4 に試料 #3 と #4 の磁界中の抵抗率の温度依存性を示す。また、Fig. 5 にその抵抗率の温度依存性から求めた不可逆磁界 B_i' と上部臨界磁界 B_{c2} 温度依存

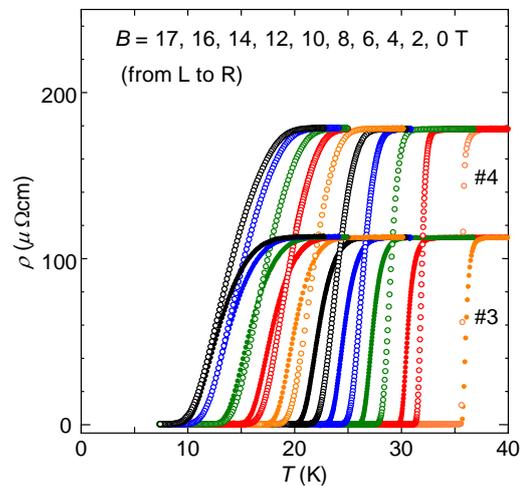


Fig. 4 Temperature dependence of the resistivity in 0-17 T for #3 and #4 specimens.

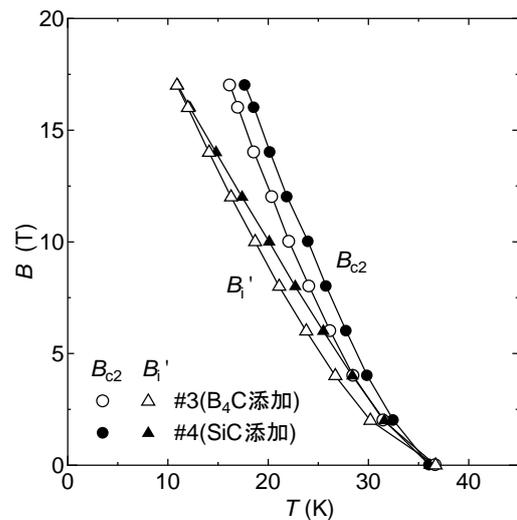


Fig. 5 Temperature dependence of the upper critical field B_{c2} and the irreversibility field B_i' for #3 and #4 specimens.

性を示す。はじめに 40 K の抵抗率の 10% で定義した不可逆磁界 B_i' に注目すると、 T_c 近傍では #4 の不可逆磁界 B_i' が高いが、温度の低下と共に #3 の不可逆磁界 B_i' が #4 の不可逆磁界 B_i' に漸近することがわかる。この傾向は決定の基準の違いにより不可逆磁界 B_i の定量的な違いはあるが、Fig. 2 の不可逆磁界 B_i' の結果と定性的に一致する結果となった。また、同じ C 添加でも磁束ピンニングに作用する効果は異なることがわかる。

次に上部臨界磁界 B_{c2} に注目すると、今回測定を行った磁界範囲では、#3 に比べて #4 の方がすべての温度領域で大きくなった。但し、ピン力密度のスケール則が変化しはじめる 20 K 近傍から #3 の上部臨界磁界 B_{c2} の温度依存性がわずかであるが大きくなっており、#4 に漸近する傾向にある。したがって、上部臨界磁界 B_{c2} の増加による不可逆磁界 B_i' の増加が確認できる。したがって、これらの結果からピン力密度 F_p の温度スケール則の変化は温度低下に伴うピン力の変化と不可逆磁界 B_i を通した上部臨界磁界 B_{c2} の変化による可能性がある。

今回の測定範囲では MgB_2 のマルチギャップに起因した上部臨界磁界 B_{c2} の顕著な上昇は測定できなかったが、ピン力密度 F_p の温度スケール則が変化しはじめる 20 K 近傍から、上部臨界磁界 B_{c2} 及び不可逆磁界 B_i の温度依存性の変化が確認できた。

ピン力密度 F_p の温度スケールのズレも温度低下と共に顕著となるため、上部臨界磁界 B_{c2} とのより詳細な関係を明らかにするためには上部臨界磁界 B_{c2} の更なる低温度領域の測定が必要である。

4. まとめ

MgB_2 の広い温度及び磁界領域の磁束ピンニング特性を調べるために、15 T の磁界下での磁化測定を行い、臨界電流密度 J_c を評価した。ピン力密度 F_p の温度スケール則から、20 K 近傍からピンニング機構が変化した。また、磁界中の抵抗率測定から評価した上部臨界磁界 B_{c2} の温度依存性から、わずかであるが温度の低下と共に上部臨界磁界 B_{c2} の上昇が測定され、温度低下に伴う主要なピンの変化と上部臨界磁界 B_{c2} の変化によってピン力密度のスケール則が 20 K 近傍からずれると考えられる。尚、マルチギャップとの関係を調べるためには更なる低温度高磁界の測定が必要である。

参考文献

- [1] K. Tanaka, *et al.*, *Advances in Cryogenic engineering*, **52B** (2006) 662.
- [2] M. Takahashi, *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.*, **18** (2005) 373.
- [3] T. Matsushita, *et al.*, *Physica C*, **468** (2008) 1833
- [4] T. Matsushita, *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.*, **21** (2008) 015008 (7pp)
- [5] A. Gurevich, *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **17** (2004) 278.
- [6] A. Yamamoto, *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.*, **17** (2004) 921.

[7] M. Kiuchi, *et al.*, *Physica C*, **445-448** (2006) 474-477.