

金属超伝導体 MgB_2 の Mg と B の比率の違いによる
超伝導特性の評価

城戸 要

平成 23 年 2 月 22 日

目次

第1章 序論	1
1.1 はじめに	1
1.2 磁束ピンニング機構	4
1.3 磁束クリープ	5
1.4 不可逆磁界	5
1.5 線材化法	6
1.5.1 PIT法	6
1.5.2 拡散法	7
1.5.3 PICT法	7
1.6 本研究の目的	8
第2章 実験	10
2.1 試料	10
2.2 実験方法	11
2.2.1 SQUID 磁力計による直流磁化法	12
第3章 実験結果と検討	15
3.1 J_c - B 特性	15
3.2 F_p - B 特性	18
第4章 まとめ	19

表 目 次

2.1 試料の比率	11
-----------------	----

目 次

1.1	磁束線のオーダーパラメータと磁束密度の構造	5
1.2	不可逆曲線	6
1.3	PICT (powder-in-closed-tube) 法	8
1.4	MgB ₂ の結晶構造	9
2.1	試料の焼成温度と焼成時間	12
2.2	四方向から磁束線が侵入した場合の流れ方と電流が流れる微小幅 dx の帯 に囲まれた領域	13
2.3	四方向から磁束線が侵入した場合の増磁過程 (下) と減磁過程 (上) における 磁束密度の空間分布	14
3.1	各試料の J_c - B 特性	16
3.2	1 T での各試料の Mg 量に対する J_c	17
3.3	3 T での各試料の Mg 量に対する J_c	17
3.4	各試料の規格化 F_p - B 特性	18

第1章 序論

1.1 はじめに

1908年、それまで永久気体であると考えられていたヘリウムの液化に成功したオランダの Kamerlingh-Onnes は、極低温での自由電子に関する Drude-Lorentz 理論を検証するために 1 K 近くまでの金属の電気抵抗を調べていた。1911年、当時最も純度が高かった水銀を液体ヘリウムで冷却していったとき、4.2 K で水銀の電気抵抗が突然測定不能なくらいに小さくなることを発見し、この状態を超伝導状態と名づけた。こうして、水銀が超伝導体として初めて発見された。その後今日までに、超伝導体は単体元素や合金、化合物等に多数存在することが発見されている。

超伝導発見後、しばらくはその分野において大きな進展はなかったとはいえ、1957年に金属超伝導体における超伝導の発現機構が Bardeen、Cooper、Schrieffer が発表した BCS 理論で説明された。BCS 理論において T_c は 40 K を超えないであろうと考えられていた。しかし、1986年に Bednorz と Müller により酸化物高温超伝導体が発見され、超伝導フィーバーといえる程の社会現象を引き起こした。工業的には高温超伝導体とは、25 K 以上の T_c を持つ物質を指す。初めて発見された第一世代となる高温超伝導体 La-Ba-Cu-O に続いて、 T_c が液体窒素温度 (77.3 K) を超えた最初の高温超伝導体 Y-Ba-Cu-O、そして T_c 105 K の Tl-Ba-Ca-Cu-O 等がある。また、試薬として販売されていた MgB_2 が、2001年に青山学院大学の秋光純教授らにより金属系では最も高い T_c である約 39 K を示す超伝導体であることが発見された。

ここで超伝導体の簡単な特性について触れると、まず超伝導体はある一定の温度下、磁界下でないと超伝導状態を示さない。それぞれの超伝導状態から常伝導状態に移行する値は臨界温度 T_c 、臨界磁界 B_c と呼ばれ、物質ごとに異なる値を持つ。さらに超伝導体の

特徴としては、電気抵抗がゼロであることと、1933年に Meissner と Ochsenfeld により発見された完全反磁性である。すなわち、超伝導体の外から磁界 H_e をかけても超伝導体内の磁束密度 B はゼロに保たれる。超伝導体は常伝導状態においてはこうした反磁性を示さず、外部の磁束は内部に一樣に侵入しており、この状態から温度を下げても超伝導状態とした時にも完全反磁性が実現する。このような完全反磁性の現象を Meissner 効果という。実際には、磁束は超伝導体の表面から数十 nm 程度内部に侵入している。しかし通常の場合、超伝導試料のサイズに比べてこの厚さは無視でき、ほぼ試料全体で磁束が排除されているとみなすことができる。

さらに超伝導体は磁性の振る舞いの違いにより第1種超伝導体と第2種超伝導体に分類される。第1種超伝導体は B_c 以下の磁界までは Meissner 効果を示し、それ以上の磁界では超伝導状態は消滅する。第2種超伝導体でも同様に B_{c1} 以下の磁界までは Meissner 効果を示すが、それ以上の磁界では超伝導体内に磁束の侵入を許しながらも、超伝導状態を保とうとする。この Meissner 効果が失われる磁界を下部臨界磁界 B_{c1} と呼ぶ。さらに超伝導体内に侵入する磁束量が増加し、超伝導体が消失する磁界を上部臨界磁界 B_{c2} と呼ぶ。第1種超伝導体の B_c に比べ非常に高い B_{c2} を有することから高磁界応用では第2種超伝導体が用いられる。

また B_{c1} と B_{c2} の間の状態は超伝導体内に磁束線が侵入していることから混合状態と呼ばれるが、ほとんどの応用ではこの混合状態下での利用となる。混合状態下において、超伝導体内に磁束線が侵入していることを考えると、超伝導電流の影響で磁束線は Lorentz 力を受ける。超伝導体内に流れる電流密度を J 、侵入した磁束線の磁束密度を B とすると、磁束線が受ける Lorentz 力 F_L は、 $F_L = J \times B$ と表せる。もし磁束線がこの F_L による駆動力を受けて速度 v を持つとすると、電磁誘導により $E = B \times v$ の電界が発生することになり、損失が生じる。こうした損失をなくすためには、磁束線の運動を止める必要があり、このことを磁束ピンニングと呼ぶ。実際には Lorentz 力を打ち消す力が必要であり、この単位体積当たりの力をピン力密度 F_p と呼ぶ。Lorentz 力 F_L がピン力密度 F_p を超えなければ電界が発生せず、電流を電気抵抗なく流せる。この最大の電流密度を臨界電流密

度と呼ぶ。そのため超伝導体の工学応用のためには臨界電流密度 J_c がとても重要となる。

2001年に発見され大きな注目を集めた MgB_2 の臨界温度はおよそ 39 K であり、酸化物超伝導体と比較すれば低いが、酸化物特有の複雑な結晶構造を持たず、金属でも軽い物質のために加工が容易であり、原材料となる Mg と B も安価であることのために応用の期待が高まっている。さらに 20 K 程度での応用が可能になれば、液体水素や冷凍機による低負荷での運用が可能となるため、冷却コストの低減が期待できる。したがって、20 K 近傍での J_c 特性向上が MgB_2 の利用の鍵となる。したがって、この J_c 決定のメカニズムを明らかにする必要がある。1.2 節でも述べるが、 MgB_2 の支配的なピンニングセンタが粒界であることが示唆されているように、 MgB_2 は F_p が多いことが原因で、磁界中の J_c が大幅に低下することが問題とされている。しかし、 MgB_2 のピン力は弱く、焼成のみで粒子サイズを調整するのは容易ではない。より強い粒界にするために、小さい粒子サイズを得る必要がある。

しかしながら、「比率の異なる MgB_2 線材を作製したところ、B の比率が化学両論的な比率 Mg:B=1.0:2.0 よりも大きい、Mg:B=1.0:2.8 という比率で作製した線材試料が、20 K の温度下において高い J_c と F_p を得た。しかし、それよりも B の比率を上げていくと、逆に F_p は減少していった。粒子サイズは B 組成の増加により、さらに小さくなる傾向があるが、これは Mg の不足が原因となる粒成長の抑制によりもたらされる。そして、未反応 Mg と B は結果として F_p の減少となる、不純物面と遮蔽電流転送として働くかもしれない」という Miura ら [4] の論文を読み、 MgB_2 を他の比率に変えることでも大幅に低下する J_c の改善になるのではないかと考えた。今後幾つかの技術的な成功を経て、 MgB_2 素線のさらなる高特性化、システムの低コスト化が進めば、 MgB_2 は新しい超伝導材料として実用化が進むと考えられる。

本研究においては、Mg:B の比率の異なる MgB_2 バルク試料を作製し、真空中で焼成を行った試料での比率の違いにより J_c や T_c への影響を研究する。

1.2 磁束ピンニング機構

第2種超伝導体の混合状態において、損失なしに電流を流すためにはピン力が必要であることは述べたが、転移、常伝導析出物、空隙結晶粒界面等あらゆる欠陥や不均一物質がピン力をもたらすことが知られている。これらをピンニングセンターという。MgB₂の場合では結晶粒界が有効なピンニングセンターとして働くと考えられていたが、実際に結晶粒径とピンニング特性の定量的な評価がされ、MgB₂における支配的なピンニングセンターが結晶粒界であることが明らかになった [1]。混合状態において、磁束は超伝導体に量子化して侵入することが知られており、これを量子化磁束という。また超伝導電子の密度は $|\Psi|^2$ で与えられ、この Ψ をオーダーパラメータという。量子化磁束とオーダーパラメータの構造は図 1.1 のようになるが、量子化磁束の中心部分はほぼ常伝導状態 ($|\Psi| \simeq 0$) で、そのサイズはコヒーレンス長 ξ 程度であることが知られており、その部分を常伝導核と呼ぶ。

ここで λ が ξ よりも十分大きい典型的な第2種超伝導体を考え、孤立した磁束線と大きさ L が $\xi \gg L \gg \lambda$ であるような常伝導析出物の相互作用を取り扱うとする。こうした常伝導析出物のために磁束線の Ψ や B の構造は乱される。しかし、 λ が常伝導析出物よりも十分大きいため、 B の乱れは小さく、無視できると考えられる。したがって、この場合のピンニング相互作用では Ψ の空間変化が主要となる。磁束線の中心から離れた部分では Ψ が平衡値 Ψ_∞ に近く、その部分のエネルギー密度は常伝導状態よりもほぼ凝縮エネルギー密度だけ低い。言い換えると常伝導核は周囲の超伝導部分よりもエネルギーが高いのである。

ところで、電子の平均自由行程を l として、 $1/\xi = 1/\xi_0 + 1/l$ のような関係が成り立つことが知られている。 ξ_0 は非局所性を表す特性距離でBCS理論により導かれたコヒーレンス長である。 ξ_0 は定数のため、 l が減少すれば ξ も減少することが分かる。結晶界面では電子を感じるポテンシャルが周期性を乱していることから電子が散乱され、平均自由行程 l の低下を通じてコヒーレンス長 ξ が短くなる。したがって、常伝導核が結晶界面のところに来るとエネルギーが高い常伝導核が細くなり、エネルギー的に得をする。このた

め結晶界面もまた引力的なピンニング相互作用をする。以上のようなピンニング機構を凝縮エネルギー相互作用と呼ぶ。

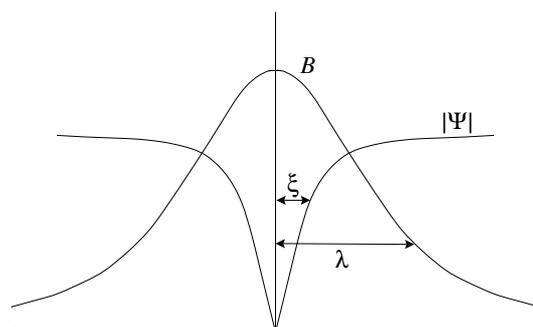


図 1.1: 磁束線のオーダーパラメータと磁束密度の構造

1.3 磁束クリープ

磁束ピンニングで決定される実用的な超伝導電流は完全反磁性に関連した超伝導電流とは大きく異なる。すなわち、後者が理想的な永久電流であるが、前者は極めて微小であるが時間経過とともに減衰する。超伝導電流が減衰するのは、磁束線がピンにより止められた状態が、完全な平衡状態ではなく準平衡状態であり、有限温度下において、熱エネルギーにより磁束線がピンから外れて動き出す確率がゼロではないためである。こうした磁束線の熱活性化運動のためにピンニング電流は時間とともにわずかにではあるが減少する。こうした現象を磁束クリープという。

1.4 不可逆磁界

高温になると磁束線の熱運動が激しくなり磁束クリープの影響が大きくなる。この時、わずかな電流でも磁束線の運動が顕著になり定常的な電界が観測される。すなわち、臨界電流密度 J_c が 0 になる。この $J_c = 0$ となる磁界 B_i を不可逆磁界という。また $B_{c2} = 0$ と $B_i = 0$ となる T は T_c である。この不可逆磁界より小さい磁界範囲では、磁化曲線は外部磁界に対して不可逆となりヒステリシス曲線を示す。これは、ピン力が常に Lorentz 力の

反対に働くため超伝導体に磁束線が入りにくく出にくいことが起因している。また外部磁界が不可逆磁界より大きい範囲において、磁化曲線はヒステリシスを示さず、可逆となる。B-T平面上における不可逆領域と可逆領域の境の曲線を不可逆曲線という。ピン力の強い試料ではこの曲線が高温側にシフトする。

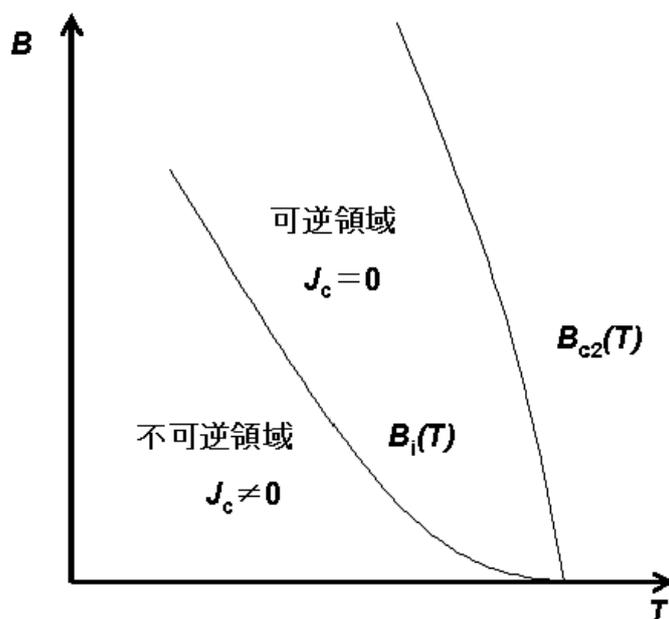


図 1.2: 不可逆曲線

1.5 線材化法

1.5.1 PIT 法

PIT (powder-in-tube) 法とは、鉄等の金属シース (保護管) の中に試料となる物質を詰めて線引き加工をし、線材とする方法をいう。現在 MgB_2 を製作する時に最も一般的に用いられる線材化の方法である。PIT 法は *in-situ* 法と *ex-situ* 法という 2 つの方法に大別される。

in-situ 法とは、未反応の物質または化合物を用いて、後で熱処理して反応させながら線材化を行う方法である。これに対して *ex-situ* 法とは、既に反応済みの物質を用いて、

線材化を行う方法である。

1.5.2 拡散法

よく用いられる線材化法としての PIT 法ではあるが、実際のところ、*in-situ* PIT 法等で作製した MgB_2 超伝導体の充填率は 50 パーセント程度と低い。臨界電流特性 J_c は充填率の影響を大きく受けるため、小さくなってしまふ。

in-situ 線材における MgB_2 超伝導体の充填率が低いことの原因は、Mg 粉末と B 粉末からの MgB_2 の生成過程にある。 MgB_2 の生成反応は、低融点かつ蒸発し易い Mg が B 粉末側に移動して起こるため、Mg 粉末が存在していた領域には反応後にボイドが生成する。そのため、Mg 粉末と B 粉末を混合して反応させるとボイドの生成が避けられない。そこで、B 粉末と Mg 粉末を混合せずに隣り合わせに充填して、Mg と B を反応させると、B 粉末側に高密度の MgB_2 超伝導体が生成する。これが、最近注目を集めている拡散法と呼ばれる方法である [2]。拡散法で作製された MgB_2 超伝導体は充填率が高く、従来の線材に比べて高い J_c を達成している。充填率が向上すれば、組織制御による磁束ピンニング効果が超伝導体の J_c に及ぼす影響は大きくなると予想される。そのため、出発材料や熱処理条件等の作製条件の最適化が一層重要になる。

1.5.3 PICT 法

PICT (powder-in-closed-tube) 法とは *in-situ* 法に属すもので、具体的には図 1.3 に示すように出発原料とする、Mg 粉末と B 粉末を金属管に詰めた後に金属管の両端を閉じてから加工、加熱処理そして生成させる方法である [3]。PICT 法の利点としては、従来の PIT 法に比べ再現性が高いことと臨界電流特性が良いことが挙げられる。

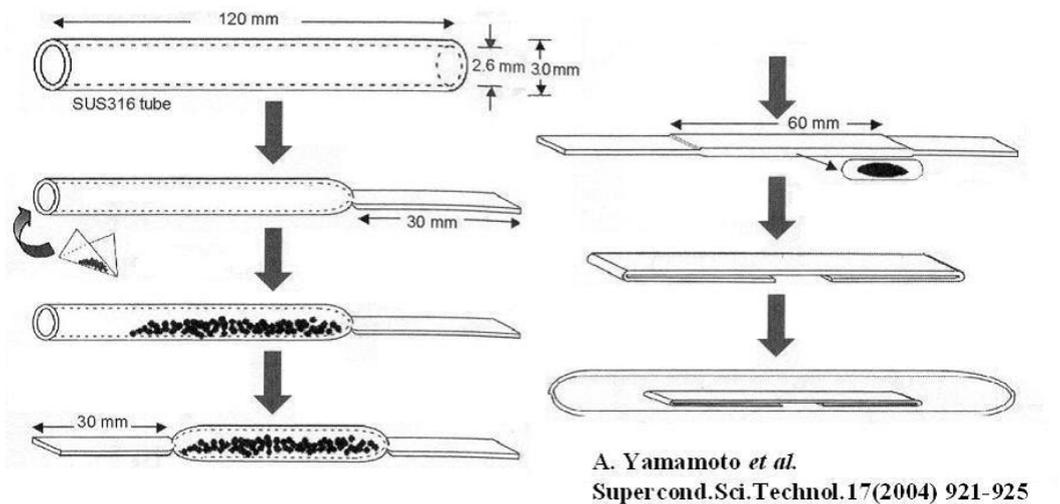


図 1.3: PICT (powder-in-closed-tube) 法

1.6 本研究の目的

2001年に発見された MgB_2 は金属系超伝導体の中で最も臨界温度 T_c が高く、また製造が容易ということなどからとても期待されている超伝導体である。結晶構造は図 1.4 に示す。

MgB_2 の実用化に向けては、高い臨界電流特性や高温での強いピン力等が必要になってくる。 Mg と B の比率を変えることによっても臨界電流密度や高温での磁界特性等が変わることが知られている [4]。

今回の研究では、 $\text{Mg}:\text{B}$ の比率の異なる MgB_2 バルク試料を作製・使用し、比率の違いによる臨界電流密度や臨界温度への影響について調べることを目的とする。

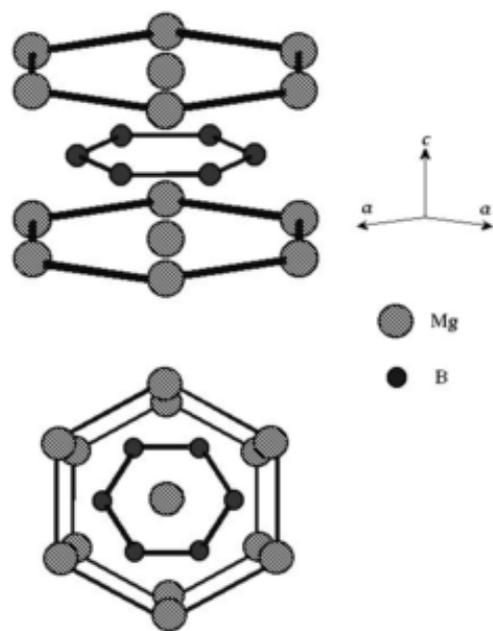


図 1.4: MgB₂ の結晶構造

第2章 実験

2.1 試料

現在行われている MgB_2 の製造法としては、金属管に粉末を詰め込み作製する PIT 法が主である。しかし、一般的な PIT 法では物質の充填率が低く、高い J_c を得ることが難しい。そこで今回は、物質の充填率を上げる拡散法と比較的高い J_c が得られやすい PICT 法を組み合わせた、拡散 PICT 法を用いた。

出発原料は純度 99.9 %、200 メッシュの Mg 粉末と純度 99 %、300 メッシュの B 粉末である。作製時に掛ける圧力に耐えられるものとして、使用したシースは SUS316 管である。比率は Mg_xB_2 の組成で x を 0.8 から 1.3 まで変化させた。試料に掛けた圧力は 8 t であり、一軸方向である。

試料作製手順は、

1. SUS 管を適当な長さに切り取る。
2. 粉末がシースから出ないようにするために、シースの片方の端から約 3 cm までの部分に圧力を掛けてシースの口を閉じる。閉じたシースの端を曲げて、さらに圧力を掛けて端を完全に折り畳む。
3. Mg 粉末と B 粉末の重さを計量し、Mg 粉末、B 粉末、Mg 粉末の順に入れて、詰める。
4. 充填率を上げるために、口が開いている方の端から Mg 粉末と B 粉末が詰められていない部分までを圧力を掛けて閉じる。
5. 再び閉じたシースの端を曲げて、さらに圧力を掛けて端を完全に折り畳む。
6. 充填率を上げるために、Mg 粉末と B 粉末が詰められている部分に圧力を掛けて、体

積を小さくする。

7. 不純物である MgO を作らないために、Mg 粉末と B 粉末を詰めたシースを石英管の中に入れて、石英管の中を減圧し 1.0×10^{-6} Torr にする。
8. 減圧している状態の石英管を図 2.1 に示すように、室温から 850 までの温度上昇を 4 時間、850 の持続時間を 24 時間、850 から 25 までの温度下降を 4 時間に設定して焼成した。
9. 焼成した試料を SUS 管から取り出して、MgB₂ バルク試料が完成する。

表 2.1 に各試料の比率と T_c に示す。

表 2.1: 試料の比率

試料	x (Mg _x B ₂)	T_c [K]
#1	0.8	38.57
#2	0.9	38.51
#3	1.0	38.54
#4	1.1	38.61
#5	1.2	38.71
#6	1.3	38.72

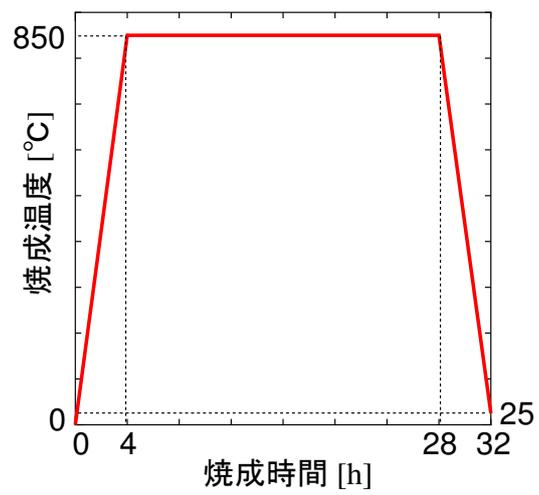


図 2.1: 試料の焼成温度と焼成時間

2.2 実験方法

本実験では作製した MgB_2 の臨界電流密度 J_c 、臨界温度 T_c を測定するため、SQUID 磁力計 (MPMS-7) を用いた。以下にこれらの測定法について示す。

2.2.1 SQUID 磁力計による直流磁化法

直流磁化測定では、ある一定温度で外部磁界を最初にマイナス 1 T を印加し、0 T から 7 T まで増磁する。そして、7 T から 0 T まで減磁し、直流磁化を測定することにより、磁化のヒステリシス曲線を得る。ある磁界における磁化のヒステリシスの幅 ΔM [emu] が臨界電流密度に比例することにより、このヒステリシス曲線から測定温度下における臨界電流密度の外部臨界依存性 ($[J_c-B]$) が求まる。ここで長さ l 、幅 w の平板状超伝導体 ($l > w$) の試料の広い面に垂直に磁界を加えた場合について考える。図 2.2 のように試料に座標を設け、試料の幅方向を x 軸、長さ方向を y 軸、広い面に垂直な方向を z 軸とし、試料の中心を原点とする。四方向から試料へ磁束が侵入し、これを遮蔽する電流は、臨界電流密度が等方的ならば、Bean モデルを仮定すると図 2.2 の試料の端から一定の距離のところを流れる環状電流となる。この位置を中心から $x \sim x+dx$ とすると、微小幅 dx 及びに z 軸方向のサイズ dz を流れる微小電流は $dI_c = J_c dx dz$ である。この環状電流に囲まれた領域の面積は

$$S = 4x^2 + 2x(l - w) \quad (2.1)$$

となる。また、この微小電流により発生する磁気モーメントは $dm = S dI_c$ となる。よって試料全体の磁気モーメントは

$$m = \int dm = \int \int S(x) J_c dx dz = J_c d \int S(x) dx \quad (2.2)$$

となる。ただし、 d は磁界の方向の試料の厚みである。これを計算すると

$$m = \frac{J_c w^2}{12} (3l - w) d \quad (2.3)$$

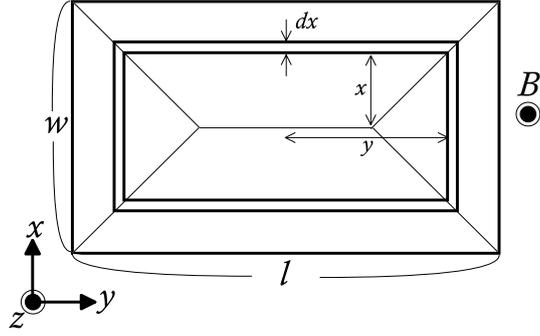


図 2.2: 四方向から磁束線が侵入した場合の流れ方と電流が流れる微小幅 dx の帯に囲まれた領域

となる。図 2.3 の下半分は増磁過程の磁束密度の空間分布で上半分は減磁過程の磁束密度の空間分布となっており、空間分布の端部にかかる磁界が H_e である。したがって超伝導体の磁化のヒステリシスの幅 ΔM に相当する磁気モーメント Δm は、式 (2.3) より、

$$\Delta m = \frac{J_c w^2}{6} (3l - w) d \quad (2.4)$$

となる。したがって磁化のヒステリシスは Δm を超伝導体の体積で割って

$$\Delta M = \frac{J_c w}{6l} (3l - w) \quad (2.5)$$

となり、臨界電流密度は

$$J_c = \frac{6l}{w(3l - w)} \Delta M \quad (2.6)$$

から評価される。なお、SQUID 磁力計から得られる磁化の測定値は [emu] であるので、これを SI 単位系に換算するために以下の式を用いた。

$$\Delta M[\text{A/m}] = \Delta M[\text{emu}] \times 10^3 \quad (2.7)$$

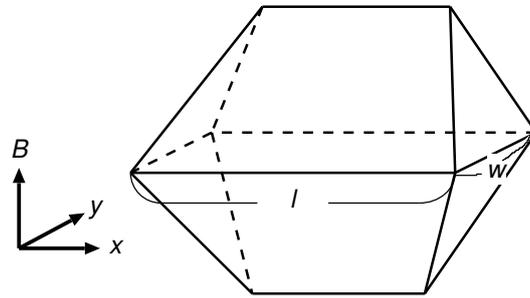


図 2.3: 四方向から磁束線が侵入した場合の増磁過程 (下) と減磁過程 (上) における磁束密度の空間分布

第3章 実験結果と検討

3.1 J_c - B 特性

図 3.1 に SQUID 磁力計による直流磁化法で表 2.1 に示す Mg:B 比で作製した各試料の 20 K の J_c - B 特性の結果を示す。この結果から、化学量論的な Mg : B = 1.0 : 2.0 を基準として Mg 比が低い試料と Mg 比が高い試料に分けて考える。

低磁界側では Mg 比の低い試料が比較的高い J_c と見せているが、高磁界側では Mg 比の高い試料の J_c の低下が比較的緩やかとなる。図 3.2 に 1 T の場合、図 3.3 に 3 T の場合の Mg_xB_2 の各試料の J_c を示した。1 T の磁界下では Mg の割合が小さい試料から順に高い J_c が見られた。3 T の磁界下では Mg の割合が少し大きい試料から高い J_c が見られた。しかし、Mg の比率が最も大きい試料は J_c はいずれの磁界においても低い J_c を見せた。まず Mg 比が低い試料について考えられることは、Mg の比率が低いとそれだけ MgO の生成される確率が低くなり、充填率が高くなる。その結果、低磁界では、電流阻害原因でもある不純物も少ないため高い J_c を得ている。一方で、Mg 比が基準より高い試料の J_c 特性について考えられることは、Mg の比率が高いとそれだけ MgO の生成される確率が高くなり、充填率が低くなる。その結果、低磁界では電流阻害原因でもある不純物が多いため低い J_c になっている。しかし、高磁界では Mg を多く入れることで、何らかのピンが多く発生したことで、 J_c の低下が抑えられたものと考えられる。

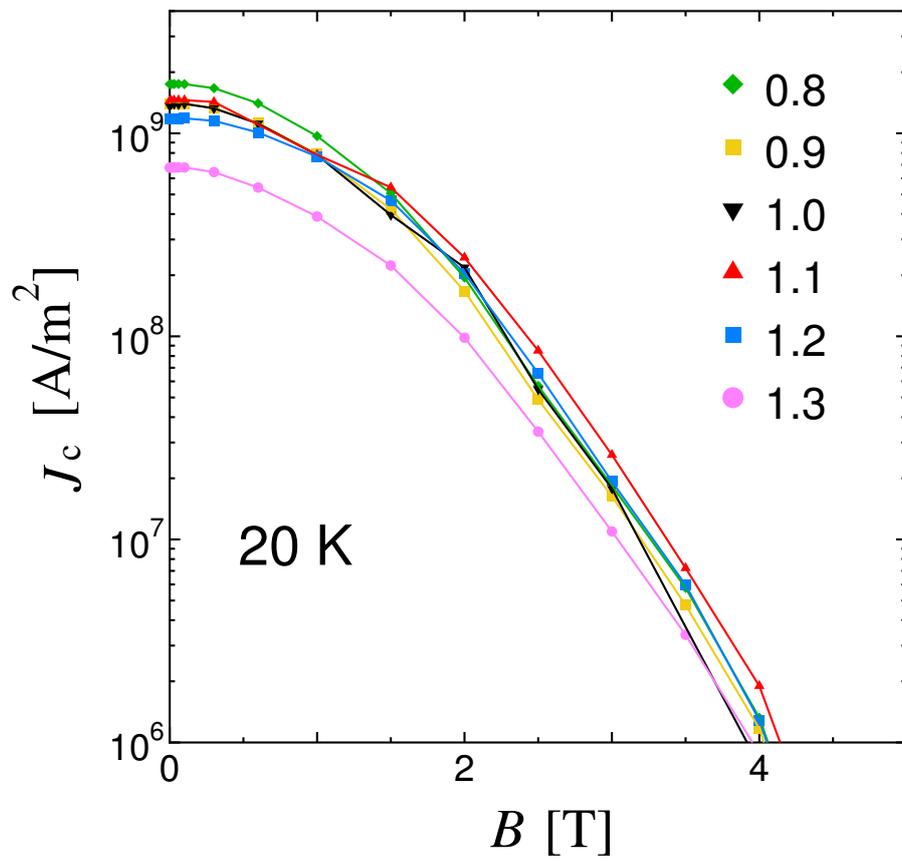


図 3.1: 各試料の J_c - B 特性

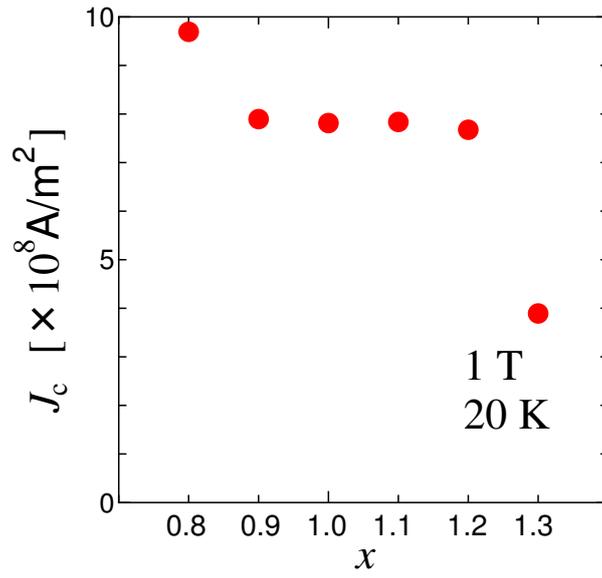


図 3.2: 1 T での各試料の Mg 量に対する J_c

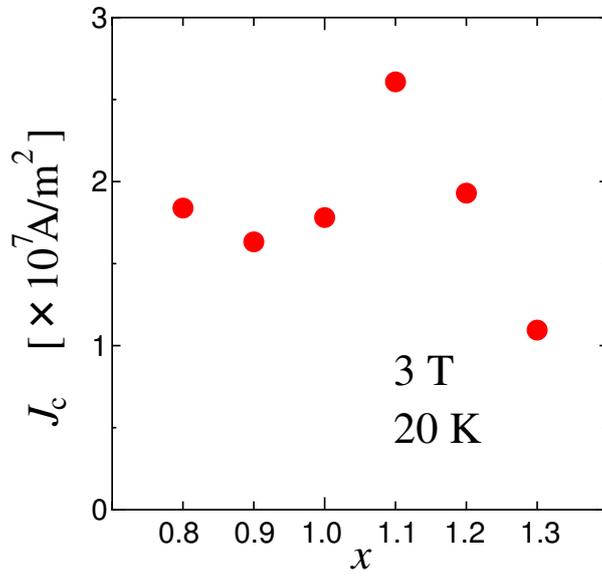


図 3.3: 3 T での各試料の Mg 量に対する J_c

3.2 F_p - B 特性

図 3.4 に各比率の試料の規格化した F_p - B 特性を示す。高磁界では Mg の比率の高い試料の規格化 F_p が比較的高いことが示される。このことからピンとなる物質がより多く生成されていることが考えられる。

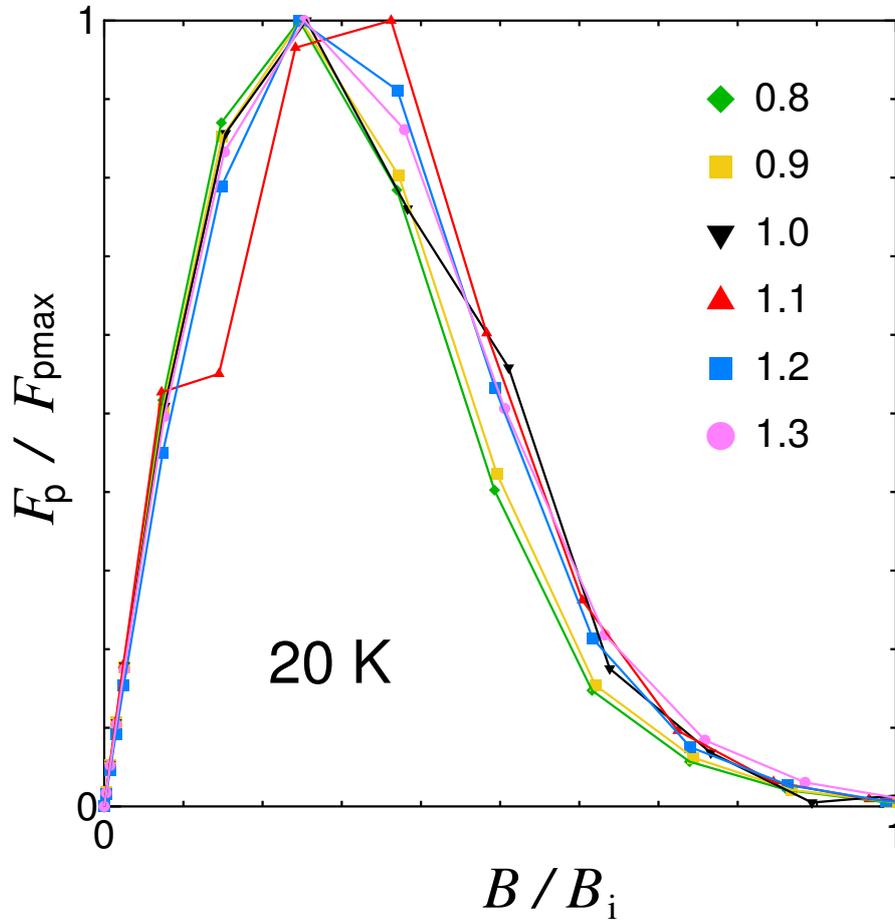


図 3.4: 各試料の規格化 F_p - B 特性

第4章 まとめ

本研究を通して、Mg:Bの比率を変えることによっても J_c に影響を与えることが分かった。Mgの比率が化学量論より低い試料の低磁界においての J_c が高いことが分かった。これはMgの比率が低いと不純物MgOの生成される確率が低くなり、MgB₂の充填率が高くなることが考えられる。Mgの比率が化学量論より高い試料の高磁界においての J_c の低下が抑えられていることが分かった。これはMgの比率が多く入れることでピンとなる物質が生成されて、磁界依存性が強くなったと考えられる。図3.4において、Mg : B = 1.1 : 2.0の試料のピン力のピークが他の比率よりも高磁界側にあることから、高磁界において本研究の試料中で最も高い J_c を出した何らかのピンの存在が考えられる。

今後の課題としては、Mg : B = 1.1 : 2.0の磁界依存性を上げる様なピンが存在するのか、そして存在していれば、どのようにすれば生成されるのかを調べる必要がある。それに関して、作製された試料のX線回折によって試料中の化合物等の存在を確認し、ピンとなる物質の同定を行う必要がある。そして、そうしたピンを増やすためにMgとBの割合をさらに詳細に変化させ、ピンの発生を最も促す焼成温度と焼成時間も探していくことが今後の J_c 特性への影響を調べる上でも重要となってくる。

謝辞

本研究を行うにあたり、多大なご指導と助言をして頂いた松下照男教授に深く感謝いたします。また小田部荘司教授、木内勝准教授ならびに谷川潤弥さんには実験や論文作成にあたって様々な御協力を頂き深く感謝いたします。最後に、公私共々お世話になりました松下研究室・小田部研究室・木内研究室所属の皆様に深く感謝いたします。

関連図書

- [1] Y. Katshura, A. Yamamoto, I. Iwayama, S. Horii, J. Shimoyama and K. Kishio: Grain Size Determinants and Grain-Boundary Pinning in In-situ MgB₂ Bulks
- [2] Y. Shimada, T. Ohashi, S. Hata, K. Ikeda, H. Nakashima, T. Mochizuki, J. Shimoyama, S. Horii and K. Kishio: Influences of Microstructure on Critical Current Properties in MgB₂ Superconducting Bulk Fabricated using a Premix-PICT Method
- [3] A. Yamamoto, J. Shimoyama, S. Ueda, Y. Katshura, S. Horii and K. Kishio: Supercond. Sci. Technol. 17(2004) 921-925
- [4] O. Miura, A. Saeki, H. Tomioka, D. Ito, N. Harada: Physica C 463-465 (2007) 812-816