

氏名	あわじ まとし 淡路 智
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成10年3月13日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
最終学歴	平成2年3月 広島大学理学研究科物理学専攻博士課程前期 修了
学位論文題目	化学気相法によって作製した $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 膜の磁束ピンニング特性
論文審査委員	主査 東北大学教授 深瀬哲郎 東北大学教授 小池洋二 東北大学教授 高中健二 東北大学教授 前田 弘 東北大学教授 小林典男

論文内容要旨

高温酸化物超伝導体の発見以来、その臨界温度が液体窒素温度を越えることから応用化には強い期待が寄せられている。現在のところ、実用化に最も近いと考えられている物質は、Bi系と呼ばれる $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ や $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ と $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ である。Bi系はすでに長いテープ線材ができるまでに至っており、低温強磁場での実用化が実現しつつある。しかし、Bi系の欠点は約30K以上の高温領域では高磁場の使用に耐えないことであり、高温でも強磁場まで使用できる $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ の実用化が期待されている。

本論文は、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 高温超伝導体の応用にとって最も重要な臨界電流特性に着目して、これに付随する超伝導の異方性、次元性、不可逆磁場の臨界電流密度への影響を明らかにし、さらに高温超伝導体の中でも最も高性能な臨界電流特性が得られる $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ を実用化するための指針を示すことを目的とする。このために、化学気相法によって高い臨界電流密度を有する $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 膜を作製し、その臨界電流密度、臨界磁場、不可逆磁場などの測定結果から磁束ピンニング理論に基づく議論をおこなった。構成は7章からなっており、各章の内容は以下の通りである。

第1章は序論であり、本研究の背景と磁束ピンニングに関する基礎について、第2章は試料の作成方法と各実験方法について述べている。

第3章以降が実験結果と議論であり、第3章では、高い臨界電流密度特性を有する試料が、化学量論組成から銅が過剰な領域で作製できることが分かった。また高臨界電流密度の試料が得られる領域で作製した試料は、類似した組織を持ち、ポイドと酸化銅と考えられる析出物が特徴であることが分かった。さらに、酸化銅の析出物が増えるに従って臨界電流密度も上昇する傾向があることが明らかとなった。これらの結果をテープ材等の実際の材料作製に生かすことによって、今後高性能のテープ材が開発されることが期待される。

第4章では、液体窒素温度(77.3K)における臨界電流密度の角度依存性の起源について明らかにした。液体窒素温度の一定温度のもとでは、磁場の角度を変えたときの臨界電流特性は磁束ピンニング力のスケール則を適用することによって説明する事ができる。これは異方性がある場合の角度スケール則を見いだした

事になり、これまで従来材料で知られた温度スケール則や歪みスケール則に相当するものが、角度の場合も成り立つことを示した。さらに、試料内部の析出物のうち基板表面から表面に向かって柱状に成長する $Y_2Cu_2O_5$ が臨界電流の角度依存性に現れるサブピーク（「肩」）の原因となることがわかった。したがって、このような異方的な析出物を積極的に導入する事によって、臨界電流の異方性を改善する事が可能となることが明らかとなった。

第5章では、磁場を c 軸に垂直方向に印加した場合 ($B \perp c$) の臨界電流密度の温度依存性に注目した結果、臨界電流の温度依存性にキックが現れ、低温で増大することを発見した。図1は、この異常が15K近傍に観測された試料に対する、臨界電流密度の磁場依存性と角度依存性を磁場の c 軸成分 ($B \cos \theta$) に対して示した図である。18.8K以上では角度依存性から求めた磁場の c 軸成分依存性 (黒丸) は $B // c$ の磁場依存性から求めた値 (白丸) と一致しないが、低温では両者の一致が見られる。固有ピンニングモデルでは、臨界電流密度の角度依存性は、その c 軸成分にのみ依存することが分かっている。したがって、異常が起こった温度以下で固有ピンニングが働いていることが明らかとなった。3次元ピンニングと2次元ピンニングの理論計算から両者の共存モデルで、観測された臨界電流密度特性はすべて説明されることが分かった。この結果、強い外的ピンニングの導入が異方的な固有ピンニングを克服する事が可能であることが分かった。

第6章では、固有ピンニングが影響しないと考えられる磁場を c 軸に平行 ($B // c$) に印加した場合に注目し、磁束ピンニング力の温度スケール則の検証と、不可逆磁場の評価を低温、強磁場まで行った。その結果、磁束ピンニングの温度スケール則が約70K以下の低温で成り立つことを見いだした。さらに、温度スケール則を用いてこれまで測定されていない100T近傍の低温高磁場までの不可逆磁場を見積もる事に成功した。

不可逆磁場は高温において $(1 - (T/T_c)^2)^{1.5}$ の温度依存性を示すが、低温では急激に増大する事が $YBa_2Cu_3O_7$ では始めて明らかとなった。この場合、規格化磁場には、角度スケール則の場合と同様に不可逆磁場を用いることが重要であることが分かった。ここで得られた結果をもとに、 $YBa_2Cu_3O_7$ の臨界面を実験的に決定した図が図2である。 $YBa_2Cu_3O_7$ の臨界面を実験的に、低温強磁場に至るまで決定したのは、これが初めてである。この臨界面の結果から、 $YBa_2Cu_3O_7$ が液体窒素温度だけでなく、冷凍機温度や液体ヘリウム温度に至る低温でも、Bi系を上回る優れた材料であることが示された。

第7章は総括であり、本論文で明らかになった結果をまとめ、今後の展望について述べている。

現在、すでにCVD法を用いた $YBa_2Cu_3O_7$ 線材の開発が行われつつあるが、今の所実用レベルには至っていない。しかし、本研

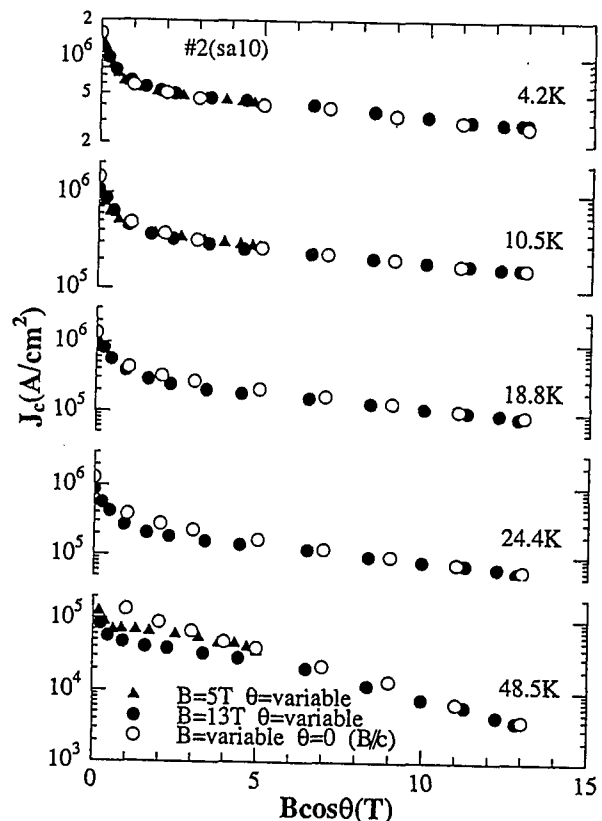


図1、各温度における臨界電流密度の $B \cos \theta$ 依存性

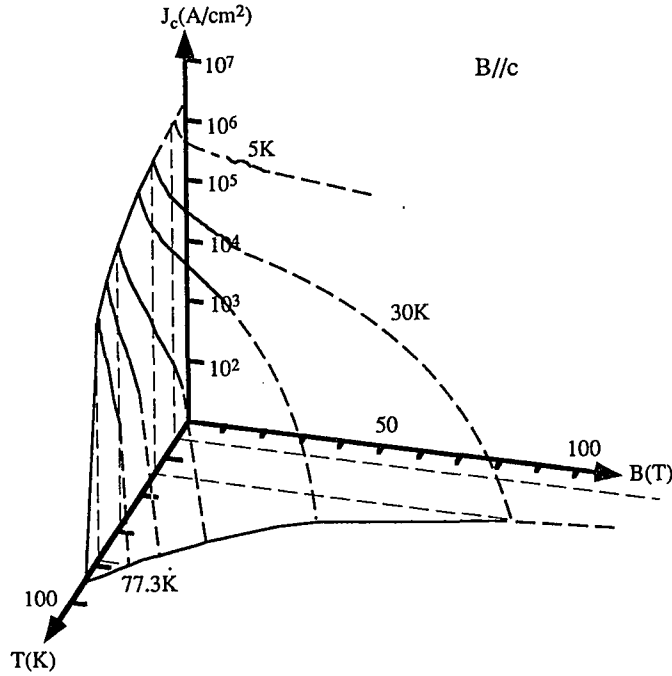


図2 化学気相法によって作製した $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 膜の $B//c$ における超伝導臨界面

究の成果を適用することによって、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ テープ線材の更なる高性能化がなされ、実用化が実現されるものと期待できる。残る問題は、粒界弱接合であるが、これに関しても最近、基板との間に中間層を形成することによって粒界弱接合をなくす試みがなされ成功している。この $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ テープ線材作製にはCVD法も用いられており、本研究の結果を直接適用することが可能である。これらの粒界弱接合の改善と組織制御による高臨界電流密度化によって、近い将来 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ テープ線材が開発され、広く応用化に適用されるものと期待される。さらに $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ テープ線材を用いたマグネットの設計の際には、本研究で得られた磁束ピンニング力の温度スケール則によって見積もられた不可逆磁場や臨界電流特性が適用されるものと考えられる。

審査結果の要旨

高温酸化物超伝導体 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ は、高温高磁場での実用化に大きな期待が寄せられている。本論文は、化学気相法で作製した $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 薄膜の臨界電流密度の磁場強度、磁場方向、温度依存性を調べることにより、磁束ピンニング機構を明らかにし高臨界電流密度化の指針を得た研究成果を纏めたもので、全文7章からなる。

第1章は序論であり、高温酸化物超伝導体の実用導体開発の現状と問題点を記述している。

第2章では、試料作製法である化学気相法と、臨界電流密度の温度、磁場強度および磁場方向依存性や不可逆磁場の測定方法について述べている。

第3章では、試料の組織観察と臨界電流密度測定を行い、磁束ピンニングに関係する微細な析出物や高臨界電流密度の得られる組織の特徴を明らかにした。

第4章では、規格化磁場として不可逆磁場を用いる事によって、臨界電流密度の磁場強度依存性は磁場方向に依存しない曲線にスケールされる事を見出した。これは、金属系超伝導材料について知られている温度スケール則が異方的超伝導体の場合には角度スケール則として成り立つことを示しており、重要な知見である。

第5章では、磁場をc軸に垂直に印加した場合の臨界電流密度の温度依存性を調べ、温度の低下によって3次元的な外的ピン止めから、高温超伝導の2次元性に起因した固有ピン止めへのクロスオーバーが起きることを検証した。この結果は、強い外的ピンニングを導入しクロスオーバー温度を下げれば、実用化の障害となっているピン止めの2次元性を克服できる事を示す重要な知見である。

第6章では、固有ピン止めが効かない磁場をc軸方向とした場合の臨界電流密度の温度依存性について調べ、不可逆磁場を規格化磁場として用いることにより、磁束ピンニングの温度スケール則が成り立つことを見いだした。この温度スケール則を用いて、測定不可能な100テスラに達する高い不可逆磁場を見積もり、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ の超伝導臨界面を低温高磁場の範囲まで決定した。これは実用上有用な成果である。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、化学気相法による $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ の高臨界電流密度薄膜の作製手法と、その磁束ピン止めの性質を解明し、実用化への指針を得たもので、超伝導工学の発展に寄与するところ少なくない

よって、本論文は博士（工学）の論文として合格と認める。