

氏 名	おお つか ひろ あき 大 塚 広 明
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学位記番号	論 工 博 第 3596 号
学位授与の日付	平 成 13 年 7 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 2 項 該 当
学位論文題目	NbTi 超電導多層板の微細組織・構造制御による高臨界電流密度化

論文調査委員 (主 査) 教授 長 村 光 造 教授 牧 正 志 教授 酒 井 明

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、リニアモーターカー等の超電導機器に必要な高性能磁気シールド用超電導材料の開発を目的に行った結果をまとめたものであって、7章からなっている。

第1章は序論であり、研究の背景である超電導技術実用化の現状を論じ、目的を述べている。

第2章ではCu/Nb/NbTi/Nbを1周期とする30層を1単位として、さらにこれらの単位を積層して超電導複合多層板を作製した。加工熱処理を施した多層板中のNbTi層およびCu層の厚さは約12 $\mu\text{m}$ となった。NbTi超電導多層板の臨界電流密度 $J_c$ を決定する磁束ピン止め点には、形態の異なる厚さ100nm程度、他方は数mmの2種類のTi析出物が有効に作用することを確認している。全体に微細な析出物の寄与が大きいが、低磁場側では大型の析出物も有効であることが明らかになった。 $J_c$ 値は圧延方向に平行と垂直では大きな異方性があることがわかったが、これは圧延方向に薄く伸ばされたTi析出物の形状によりピン止め力が異なることによると考えられた。

第3章では多層板のNbTi層中に析出する2種類のTi析出物の形態の加工熱処理依存性を調べたところ、350 $^{\circ}\text{C}$ 、8hrの熱処理により厚さ100nm程度の大型析出物がマトリックスとバース関係を保ちながら結晶粒界に析出し始める。350 $^{\circ}\text{C}$ 、336hrを越えると粒内に微細なTi析出物が観察されるようになる。高い $J_c$ 値を得るためには微細な粒内析出物が重要であることを検証した。さらにTEMで観察したTi析出物のサイズや空間分布をもとに直接和を仮定してモデルをたて理論的に巨視的ピン力を見積もったところ、実測値をよく説明することができた。

第4章では時効熱処理により十分に大型のTi析出物を析出させた後、圧延で強加工を加えることにより、大型のTi析出物を微細化し、 $J_c$ の向上を試みた。時効処理後75%冷間圧延を加えると大型のTi析出物は厚さ数10nmまで薄く伸ばされ、 $J_c$ 値は幅方向で約3倍の高い値が得られるようになった。しかし圧延方向では $J_c$ 値は約2倍程度しか向上しなかった。これは350 $^{\circ}\text{C}$ における長時間の熱処理により銅層が軟化し、NbTi層との硬さの差が大きくなったことにより圧延方向で加工不均質性によりNbTi層にくびれが生じたことが原因であることを明らかにした。スケーリング理論を用いた検討結果から本研究の多層構造では巨視的ピン力は1テスラの磁場付近で最大となり、5テスラでは1/5から1/8になることを明らかにした。

第5章ではさらに高い $J_c$ 値をもつ多層板を実現するため、Nb層を人工ピンニング層とする材料を開発した結果を述べている。Nbをピンニング層とするNbTi/Nb多層膜に塑性加工性を改良するため析出硬化型Cu合金(Cu-3Ni-0.6Si-0.2Zn)を介在させた多層板を作製した。

代表的な構成はNbTi超電導551層、人工ピン580層、Cu合金28層、無酸素銅2層でNb間隔が19nmになるように設計された。この多層板の巨視的ピン力の磁場1テスラでの値は上記4章で述べた多層板の3倍以上になることが明らかとなった。とくに最適化された試料では1.5テスラの磁場で18GN/m<sup>3</sup>の極めて高い巨視的ピン力をもつことが明らかとなった。

第6章ではリニアモーターカー用シールドを想定し、多層材の交流磁場シールド特性を調べたところ約1テスラの磁場において40Hzの交流磁場を0.3%までに減衰させる効果があることが確認された。すなわち5テスラ程度の直流磁場を透過

させた状態で約1テスラの変動磁場を効果的にシールドするために本研究で開発した超電導複合多層材は適合することを実証した。

第7章は結論であり、本論文で得られた成果を要約している。

### 論文審査の結果の要旨

本論文はリニアモーターカー等の超電導機器に必要な高性能磁気シールド用超電導材料の開発を目的に行った結果をまとめたものであって、その主な成果は次の通りである。

- (1) Cu/Nb/NbTi/Nbを1周期とする30層を1単位として、さらにこれらの単位を積層して高い臨界電流密度 $J_c$ をもつ超電導複合多層板の開発に成功した。
- (2) NbTi層中に析出する2種類のTi析出物の形態の加工熱処理依存性を調べたところ、350°C、8hrの熱処理により厚さ100nm程度の大型析出物がマトリックスとパーガス関係を保ちながら結晶粒界に析出し、350°C、336hrを越えると粒内に微細なTi析出物が観察されるようになる。TEMで観察したTi析出物のサイズや空間分布をもとに直接和を仮定してモデルをたて理論的に巨視的ピン力を見積もったところ、実測値をよく説明することができた。
- (3) 時効処理後75%冷間圧延を加えると大型のTi析出物は厚さ数10nmまで薄く延ばされ、その結果 $J_c$ 値は幅方向で約3倍の高い値が得られるようになった。しかし圧延方向では加工不均質性によりNbTi層にくびれが生じ $J_c$ 値は約2倍程度しか向上しなかった。スケーリング理論を用いた検討結果から本研究の多層構造では巨視的ピン力は1テスラの磁場付近で最大となり、5テスラでは1/5から1/8になることを明かにした。
- (4) さらに高い $J_c$ 値をもつNb層を人工ピンニング層とする材料開発に成功している。Nbをピンニング層とするNbTi/Nb多層膜に塑性加工性を改良するため析出硬化型Cu合金(Cu-3Ni-0.6Si-0.2Zn)を介在させた多層板を作製した。代表的な構成はNbTi超電導551層、人工ピン580層、Cu合金28層、無酸素銅2層でNb層間隔が19nmになるように設計された。この多層板の巨視的ピン力の磁場1テスラでの値は上記(1)項で述べた多層板の3倍以上になることが明らかとなった。
- (5) リニアモーターカー用シールドで必要とされる交流磁場シールド特性に関して5テスラ程度の直流磁場を透過させた状態で約1テスラの変動磁場を効果的にシールドするために本研究で開発した超電導複合多層材は適合することを実証した。

以上要するに本論文は、交流磁気シールド用超電導複合多層板の開発を目的に行った結果をまとめたもので、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また平成13年5月14日、論文内容とそれに関連した試問を行った結果、合格と認めた。