

Bi 系 酸 化 物 超 伝 導 体 (001) ね じ り 粒 界 の ジ ョ セ フ ソ ン 接 合 特 性

Characterization of (001) twist boundary as a Josephson-junction in Bi-based oxide superconductor

藤 盛 靖 弘*・富 田 成 明**・石 田 洋 一*・森 実*

Yasuhiro FUJIMORI, Nariaki TOMITA, Yoichi ISHIDA and Minoru MORI

1. 序

酸化物超伝導体はその高い臨界温度と臨界電流特性により多様な応用の可能性があり、発見以来世界規模で実用化を目指した研究が多く行われてきている。エレクトロニクスの分野においては特にジョセフソン素子としての実用化の可否が大きな鍵である。

ジョセフソン素子にはさまざまなタイプがあるが、中でも SIS (超伝導体-絶縁体-超伝導体), SNS (超伝導体-常伝導体-超伝導体) などのトンネル接合型が制御性の点で最も有望であり、多くの研究がなされている。しかし実用化に当たって多くの問題を抱えている。現在のところ実用化は大変に困難な状況である。その原因は酸化物超伝導体のコヒーレンス長が大変に短くそのため障壁層を大変に薄くしなければならない技術的困難さ、および異種材料の接合であることにより良好な界面状態を実現させる困難さ、とが挙げられる。このトンネル接合型ジョセフソン接合の特殊なタイプに「粒界接合型」がある。これは文字どおり酸化物超伝導体の結晶粒界そのものを利用したタイプのもので、上記のような問題点を克服しており、しかも作製しやすいことから現在のところ最も実用化に近いと言われている。実際 Y 系の傾角粒界を人工的に作製し、特性を制御して SQUID を作る、という研究例^{1),2)}がある。

このように酸化物超伝導体の結晶粒界にはジョセフソン接合という性質がある一方で臨界電流密度 J_c を低下させている原因であるという指摘がされている³⁾。また粒界割れや水分による劣化の原因にもなっており、実用化に際しては結晶粒界の諸特性を評価し、制御していくことが重要である。

ここでは酸化物超伝導体の結晶粒界の特性評価の一環として $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ の (001) ねじり粒界を取り上げる。Bi 系酸化物超伝導体では (001) ねじり粒界が多数

生成していることが電子顕微鏡観察から明らかにされている⁴⁾。この (001) ねじり粒界は弱結合部になっており⁵⁾、ジョセフソン効果が観測できる可能性がある。

本研究ではまず C 面ねじり粒界における J_c のねじり角依存性、特に $\Sigma=5$ (格子点のうち 5 つに 1 つが一致するような界面、以下同様)、 $\Sigma=13$ 、 $\Sigma=17$ などの規則粒界における依存性について調べ、評価した。さらに傾角粒界に比べて安定な (001) ねじり粒界でジョセフソン接合となっているかどうかを調べるためにジョセフソン効果の観測を試みた。

2. 実 験

試料は単結晶片を固相接合せた双結晶 (図 1) を用いた。まず単結晶を作製した。まず Bi_2O_3 、 SeCO_3 、 CaCO_3 、 CuO を $\text{Bi}:\text{Sr}:\text{Ca}:\text{Cu}=2.2:2.2:1:2$ のモル比で約 3 hr エタノール中で湿式混合を行い、 $800^\circ\text{C} \times 5$ hr 仮焼し、粉碎、再混合した。次いで $1000^\circ\text{C} \times 10$ hr にて溶解、保持させ、 $2^\circ\text{C}/\text{hr}$ で 800°C まで徐冷し、室温まで空冷させた。そして得られたバルク試料を粉碎、へき開 (結合の最も弱い BiO サイトにおいて優先的にはがれる) させ、約 $1\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 10 \sim 20\mu\text{m}$ の大きさの単結晶片を得た。この単結晶片の (001) 面同士を任意のねじり角でアルミナ板上で重ね合わせその上に約 500 g の

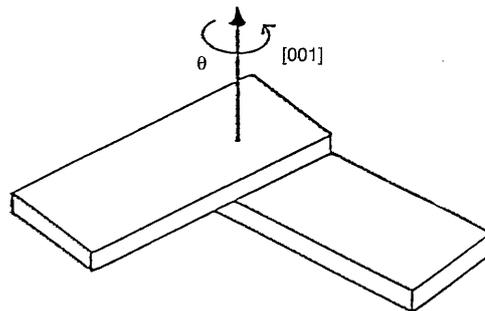


図-1 ねじり双結晶

* 東京大学生産技術研究所 第 4 部

** 旭硝子研究所

研 究 速 報

おもりで加圧して、赤外線イメージ炉中で880℃×5 hrにて固相接合させることにより、双結晶が得られた。

双結晶界面での J_c は四端子法で J-V 特性を測定することによって得た。測定は30 kで行った。

ジョセフソン効果の測定は同じく四端子法で I-V 特性をシンクロ・スコープで観測することにより行った。測定条件は、双結晶試料をホルダーごと液体 He に浸して冷却し (4.2K), 10 GHz のマイクロ波を照射するというものであった。

3. 実 験 結 果

図 2-1, 2 に双結晶界面の J-V 特性を示す。ここで $J = (\text{電流値}) / (\text{見かけ上の接合面積})$

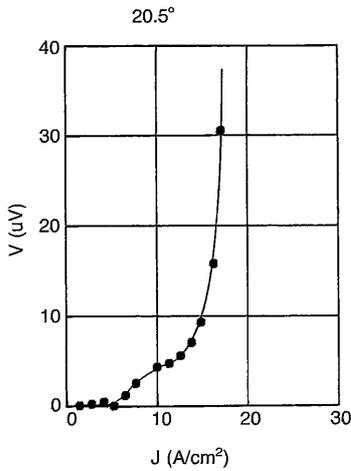


図-2-1 J-V 曲線 ねじり角20.5°

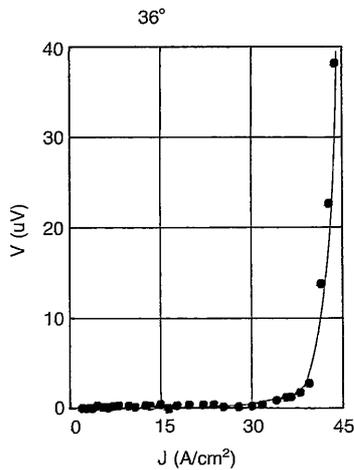


図-2-2 J-V 特性 ねじり角36°

である。曲線においてはある J 値でまず有限抵抗が生じて緩やかに電圧が増加し、さらに J を増していくと急激に電圧が立ち上がっていた。初めの電圧の立ち上がりは双結晶界面の超伝導性が壊れる現象に対応し、急激な立ち上がりは双結晶全体の超伝導性が壊れることに対応する。このように曲線上に裾の部分が存在することより、双結晶界面が弱結合部であることがわかる。ここで急激に立ち上がる J 値が双結晶のねじり角によって異なっていることより、

$$\text{接合面積率} = \frac{\text{(実際の接合面積)}}{\text{(見かけ上の接合面積)}}$$

も異なっているとわかる。もしも界面の100%が接合できているなら単結晶の J_c と双結晶全体の J_c は同じである。それゆえ接合面積率は、

$$\text{接合面積率} = \frac{\text{(J-V 曲線から得た双結晶全体の } J_c)}{\text{(単結晶の } J_c)}$$

で求めることができる。このとき

$$\text{正確な } J_c \text{ 値} = \text{(J-V 曲線から得た界面の } J_c) \times \text{(接合面積率)}$$

で算出される。

図 3 に接合面積率のねじり角依存性を示す。Σ = 5 (ねじり角36.8°), Σ = 13 (22.6°), Σ = 17 (28.1°) の規則粒界を持つねじり角において高い接合面積率が得られている。また規則粒界でないねじり角では接合面積率が低く、中には接合のできなかったねじり角のものもあった。このように規則粒界において接合面積率が高くなっていることはこれらの粒界の安定性を物語っている。

図 4 には J_c のねじりの角依存性を示す。こちらのほうも Σ = 5, Σ = 13, Σ = 17 の規則粒界を持つねじり角において単結晶と大きく変わらない程度の高い J_c 値が得られている。また Σ = 5 において理想的な Σ 値を中心

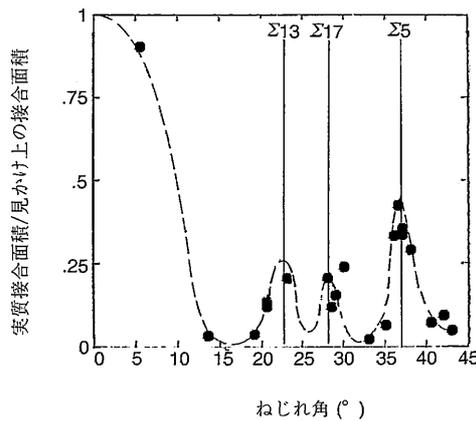


図-3 接合面積率のねじり角依存性

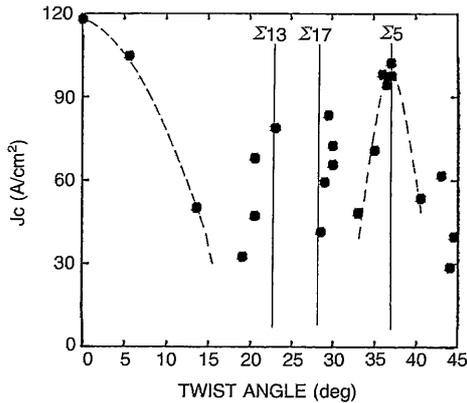


図-4 Jcのねじり角依存性

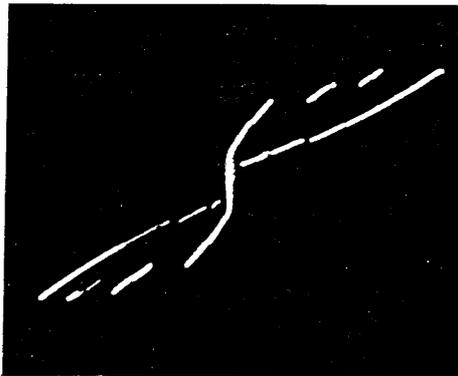


図-5 ジョセフソン効果
X : 20mV/div
Y : 1mA/div

とするピークが見られている。さらに小角 ($\Sigma=1$) においてもねじり角を増すにつれ J_c 値が減少していく傾向がみられている。 J_c については以上のような規則粒界における依存性が見られた。これは規則粒界においては理想的なねじり角から角度がずれるにしたがって導入された転位が増加していくのであるが、これらの転位においては超伝導秩序パラメーターが減少する、すなわち超伝導性が悪化するために J_c が減少していくからであると説明できる。

ジョセフソン効果は全体的に接合面積が大き過ぎて観測が難しく、ただ一つの実験試料において観測ができた。(図5) $V=0$ において直流ジョセフソン効果が観測された。 $I_c \approx 0.7$ mA である。次に交流ジョセフソン効果を示すシャピロ・ステップが観測され、さらにヒステリシスを描いており、これらの観測から双結晶界面は SIS 型的なジョセフソン接合となっている、と結論できる。

4. 考 察

(001) ねじり粒界ではねじり角による J_c の変化が Y 系傾角粒界に比べて小さく、また規則粒界での J_c が単結晶とあまり変わらないことも併せて、(001) ねじり粒界が電気的特性に対して比較的安定であると言える。(001) ねじり粒界においてジョセフソン効果が観測され、素子として利用できる可能性が考えられる。 $\Sigma=5$, $\Sigma=13$, $\Sigma=17$ の規則粒界において接合面積率においても J_c 値においても高い値が得られており、素子としての利用を考えた場合に、特に $\Sigma=5$ においては、構造的にも特性的にも安定した接合を作製できることを示している。また J_c のねじり角依存性から、ジョセフソン効果のねじり角依存性の可能性があり、ねじり角を変えることで素子の特性を制御できることが期待される。ジョセフソン効果のねじり角依存性を評価していくためには接合面積の小さな接合試料を作製する必要があり、今後の課題である。

5. 結 論

以上の実験結果をまとめると以下ようになる。

- 1) J-V 曲線は裾を引いており双結晶界面は弱結合部であることを示した。
- 2) $\Sigma=5$, $\Sigma=13$, $\Sigma=17$ の規則粒界では接合面積率が高く、これらの粒界の安定性を示している。また J_c 値でも高い値が得られた。
- 3) $\Sigma=5$ において J_c のピークが見られた。また小角においても同様の傾向がみられている。(001) ねじり粒界では傾角粒界等に比べ、 J_c のねじり角依存性が小さい。
- 4) 双結晶界面において直流、交流ジョセフソン効果が観測され、ジョセフソン接合となっていることがわかる。(1992年3月23日受理)

参 考 文 献

- 1) R. Gross, P. Chaudhari, M. Kawasaki and A. Gupta: Phys. Rev. B42(1990)10735
- 2) M. Kawasaki, P. Chaudhari, T. H. Newman and A. Gupta: Appl. Phys. Lett. 58(1991)2555
- 3) D. Dimos, P. Chadhari, J. Mannhart and F. K. LeGoues: Phys. Rev. Lett. 61(1988)219
- 4) Y. Takahashi, M. Mori and Y. Ishida: Appl. Phys. Lett. 55(1989)31
- 5) N. Tomita, Y. Takahashi, M. Mori and Y. Ishida: Jpn. J. Appl. Phys. 29(1990)30