

# 高感度磁気センサーへの応用を目指した高温超電導素子の作製

米子工業高等専門学校 谷村 凌

## 要旨

本研究では高性能磁気センサーの普及を目指して、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_y$  ( $n=1\sim 3$ )高温超電導体針状結晶(以後:Bi系ウィスカー)の特性や構造を利用しているクロスジャンクションに興味をもち、電気特性について検証した。その結果、クロスジャンクション特有の電気特性を得る事が出来た。これは高感度な磁気センサーを作るうえで重要な特徴である。

## 1. 緒言

現代のセンサー産業では、半導体を用いたセンサーが主流である。この半導体センサーでは磁気分解能が小さいものでも  $10^{-7}\text{T}$  ほどである。その中、私は超電導体を用いた新たなセンサーが注目を集めていることを知った。超伝導センサーは、その磁気分解能が  $10^{-14}\text{T}$  と非常に小さい。これは地磁気の1億~10億分の1程度である。更に、超電導体は通電時の熱損失がゼロであり、究極の省エネルギー材料とされる。その中でも、高温超電導体は超電導状態を保てる温度の限界値(臨界温度:  $T_c$ )が高く、液体窒素温度(77K)で使用可能であるため、その実用性に期待が集まっている。

しかしながら、超電導体センサーの作製には、高価な装置が多く必要なため市場には出回りにくい。私は世界一の性能を持つ超電導体センサーを普及させたいと思い、高価な装置を用いない超電導体センサーについて調べた。様々な文献を調べていくと、高価な装置を用いず、学生でも容易に作製できるクロスジャンクション文献に興味をひかれた。<sup>1)</sup>クロスジャンクションとは、図1のように細長い超電導体二本を基板の上に十字に重ねて接合したセンサーである。

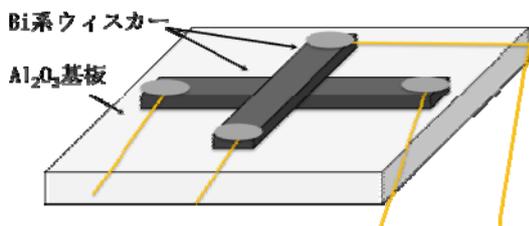


図1 クロスジャンクションの構造

本研究では、作製し易く特性の良い単結晶超電導体であるBi系ウィスカーを使用し、クロスジャンクションを作製した。

Bi系ウィスカーは、超電導層である  $\text{CuO}_2$  面と、絶縁層で

ある  $\text{BiO}$  面とが交互に積層する構造となっている(図2参照)。

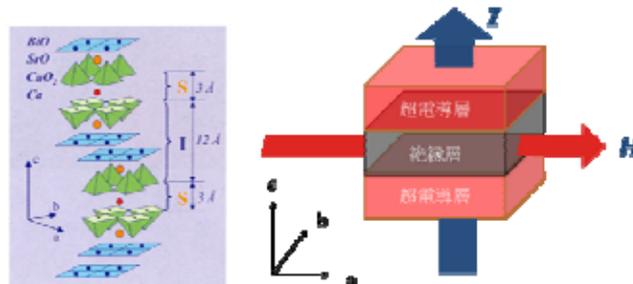


図2 ジョセフソン効果

クロスジャンクションの特徴は、中心の接合部に電流を流したとき、接合部を通過する微小な磁束に反応するというものである。中心の接合部は、図2のようにジョセフソン効果と呼ばれる超電導特有の現象を示すような接合(ジョセフソン接合)である。ジョセフソン効果とは、超電導状態の物質で薄い絶縁層を挟んだ構造をしている時に、磁束を敏感に感知する事ができるという現象である。これが、超電導体センサーの性能を世界一にしている理由である。

本研究では、クロスジャンクションの作製条件の最適化、クロスジャンクション特有の性質であるギャップ電圧の観測を行い、最終目標として微細加工を用いない磁気センサーの作製を目指して研究を行った。

## 2. 実験方法

### 2.1 クロスジャンクションの作製方法

まず、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  基板の上に Bi 系ウィスカー二本を十字に配置し、Agペーストで Bi 系ウィスカーの両端を固定する。その後、両端に Ag 電極を形成することでクロスジャンクションを作製する。また、Bi 系ウィスカーを上手く接合させるために、加熱温度 860~890、酸素流入 120ml/min にし、25min 焼成する、酸素アニール処理を用いている。

熱処理を行う際に Bi 系ウィスカーから酸素が放出され、脆く非超電導層を多く含む Bi 系ウィスカーとなる。酸素アニール処理とは、温度に合わせ酸素を一定量流入させ再び Bi 系ウィスカーに酸素を取り込ませ、Bi 系ウィスカーの劣化を防ぐというものである。

## 2.2 分析方法

### (1) 走査型電子顕微鏡(SEM)観察

クロスジャンクションの表面及び、接合部の観察には走査型電子顕微鏡(SEM: Scanning Electron Microscopy)を用いる。SEMは試料表面に電子線を照射し二次電子を励起させ、それを検出し光に変換することによって、試料の拡大像を得る装置である。

### (2) 電気特性測定

作製したクロスジャンクションの電気特性を評価するため、四端子通電法を用いて電気抵抗 温度特性( $R-T$ )及び電流電圧( $I-V$ )特性を測定した。

四端子通電法とは、図3のように回路を構成し、試料による電圧降下を測定する事で、抵抗値を調べる方法である。

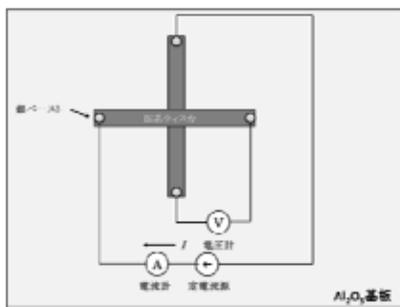


図3 四端子通電法の概略図

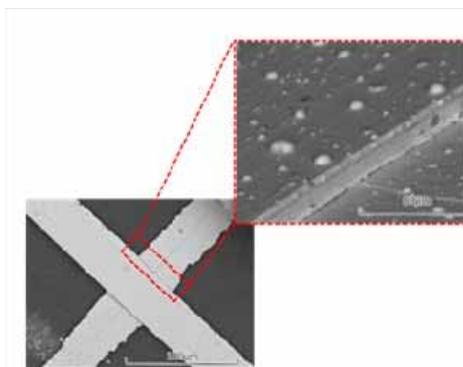


図4 クロスジャンクションのSEM像

## 3. 実験結果と考察

### (1) クロスジャンクションの観察

図4に、作製したクロスジャンクションのSEM像を示す。図から、クロスジャンクションの中心部が平坦に接合されていることが確認できる。この接合部に電流が流れることによ

って、特有のジョセフソン接合特性が発現すると期待できる。しかし、Bi系ウィスカーの表面を観察すると、いくつかの凹凸が見られることが分かった。この凹凸の原因として、表面からBi元素が蒸発していることが考えられる。なぜならば、Bi元素の融点は800以下であるため、接合作製時の高温熱処理によって表面から蒸発することが可能だからである。これを防ぐためには、熱処理時にクロスジャンクション周辺をBi元素で充満させることで防ぐことが出来ると思われる。

### (2) $R-T$ 特性

図5に作製したBi系ウィスカー単体の $R-T$ 特性を示す。この図から、 $T = 79K$ で抵抗値が急激に減少し、超電導状態になっていることが分かる。抵抗値が急激に減少し始める時の温度は臨界温度 $T_c$ と呼ばれている。

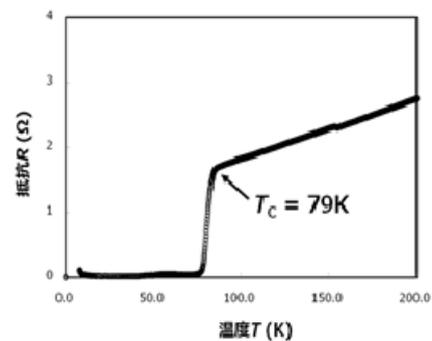


図5 Bi系ウィスカー単体の $R-T$ 特性

一般に、高品質なBi系ウィスカーの $T_c$ は80K程度であることが分かっているため、実際に作製したウィスカーは高品質であるといえる。

次に、クロスジャンクションの $R-T$ 特性を図6に示す。

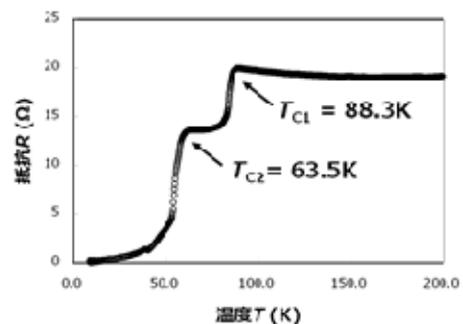


図6 クロスジャンクションの $R-T$ 特性

この図において、図5とは異なり $T_c$ と思われる点が $T = 88.3, 63.5K$ と二か所存在していることが分かる。これは、クロスジャンクションの構造に起因するものである。クロスジャンクションは2本のBi系ウィスカーから成り立っており、それぞれの $T_c$ が異なるため、このような現象が起こる。

しかし、 $T=63.5\text{K}$ で抵抗値が急激に減少しているが、実際にゼロとなっているのは  $10\text{K}$  付近と非常に低い。これは、(1)でも説明したように、Bi系ウィスカー接合時の熱処理による表面の凹凸が原因であると考えられる。したがって、上述したような処理を作製時に加えることで、特性は改善されると思われる。

(3)  $I$ - $V$ 特性

図7及び図8に、クロスジャンクションの  $I$ - $V$ 特性を示す。

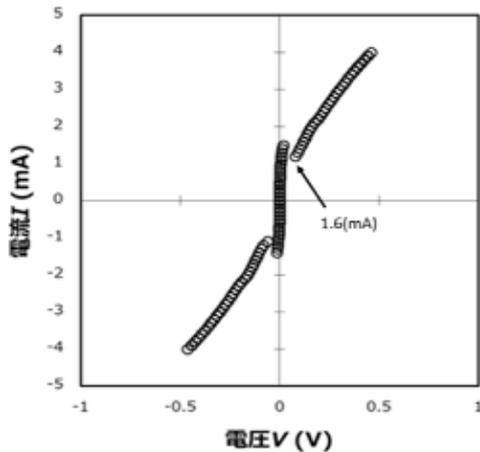


図7 クロスジャンクションの  $I$ - $V$ 特性

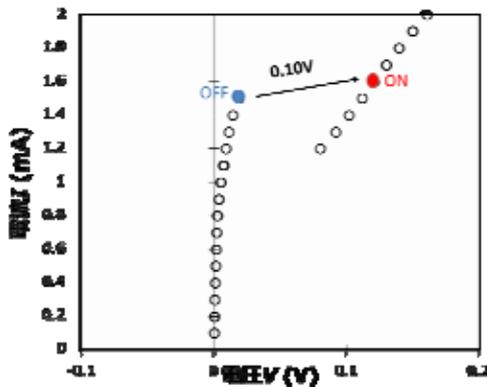


図8 ギャップ電圧の拡大図

この図において、ゼロ電圧から急に有限の値へと電圧が飛んでいるのが見られる。この飛びをギャップと呼び、その時の電圧値をギャップ電圧という。ギャップ電圧とは、超伝導電流がBi系ウィスカーに自然に形成されているジョセフソン接合を通過することで発生している。そのジョセフソン接合一層分を通過した際に発生するギャップ電圧は、およそ  $30(\text{mV})$ であることが明らかとなっている。<sup>2)</sup>すなわち、今回作製したクロスジャンクションで発生したギャップ電圧  $0.10(\text{V})$ は、約3層分のジョセフソン接合を通過していることを示している。したがって、作製条件を最適化したことによって、クロスジャンクションを上手く形成することができたといえる。このギャップ電圧が存在することにより、省エネルギー

的なスイッチへの応用も期待できる。従来のスイッチはOFFからONになるまでに電力の損失が生まれてしまう。ここでは、整流用ダイオードを例として挙げる。整流用ダイオードの理想的な特性は、順方向の電圧降下が無く( $V_F=0\text{V}$ )、逆方向に電圧を印加しても電流を完全に阻止する( $I_R=0\text{A}$ )ものである。しかしダイオードの電流電圧特性は、現実には図9のように順方向に電流を流すと電圧降下  $V_F$ が生じ、逆方向に電圧を印加すると逆電流  $I_R$ が流れる。

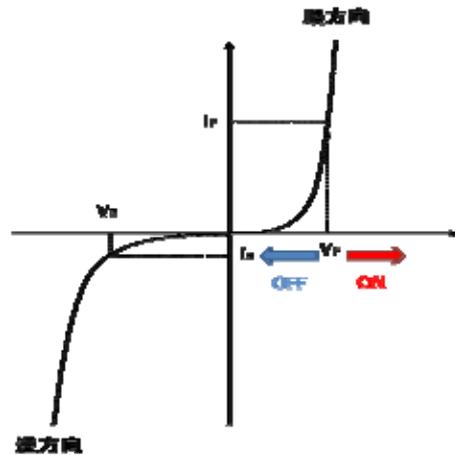


図9 ダイオードの電流電圧特性

この  $V_F$ 、 $I_R$ によって電力損失が発生し、温度が上昇する原因を作っている。<sup>3)</sup>しかし、ギャップ電圧を用いた場合、電圧が飛ぶ直前の値をOFF、飛んだ直後の値をONとすると、OFFからONとなるときの消費電力は0になるのである。

4. 今後の展望

今後は、クロスジャンクションが磁気センサーとして働くことを確認するために、ジョセフソン接合部に磁場を印加し、ギャップ電圧の発生地点の変化を見たいと考えている。

これは、微小な磁場によってギャップ電圧が発生する電流値が急激に変化するためである。また、高性能磁気センサーには、超伝導量子干渉計(SQUID: Superconducting Quantum Interference Device)と呼ばれるセンサーがある。SQUIDとは、超伝導状態の電流経路のループの中にジョセフソン接合を二つ有する構造を持っているセンサーである。しかし、現在安定してSQUIDを製造するためには、高価な微細加工装置が必要であり、微細加工後の表面には劣化層ができてしまう場合も確認されている。

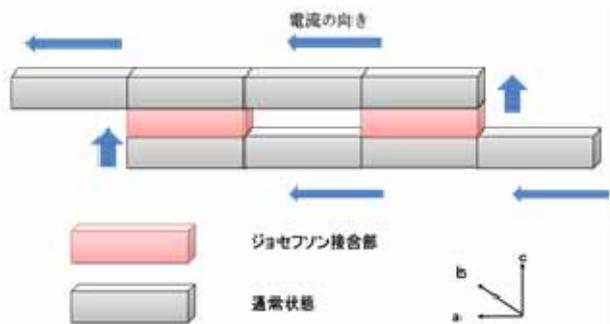


図 10 Bi系ウィスカーを用いた SQUID の構造

また、SQUID には低温超電導体がいわれていることにより、液体ヘリウムで冷やさなければならない。液体ヘリウムは 1 当たり液体窒素の約 10 倍の値段がかかる。そのため、SQUID を普及させるには、安価で、微細加工を用いない方法の模索が必須である。そこで、磁気センサーとしての働きを確認した後、Bi 系ウィスカーを用いたクロスジャンクションを SQUID に応用していきたいと考えている。

## 5. 結言

私は、Bi 系ウィスカーを用いたクロスジャンクションを高

性能磁気センサーである SQUID へ応用することを最終目的として実験を行った。今回は、クロスジャンクション特有の性質であるギャップ電圧の発生の有無について検証した。クロスジャンクションの電気特性を測定したところ、 $I$ - $V$ 特性において、クロスジャンクション特有の性質であるギャップ電圧が確認された。

以上の事から、作製したクロスジャンクションは、磁気センサーとしての機能を備えていることが確認できた。また、微細加工を用いずに SQUID へ応用することが可能である可能性を見出した。

## 参考文献

- 1) Y. Takano, T. Hatano, A. Ishii, A. Fukuyo, Y. Sato, S. Arisawa, K. Togano : "Fabrication of Bi2212 cross-whiskers junction" *Physica C*, Vol.362, pp.261-264 (2001)
- 2) A. Yurgens, L.X. You, M. Torstensson, D. Winkler : "Intrinsic Josephson junctions formed inside ultra-thin BSCCO single crystals", *Supercond.Sci.Technol.*, Vol.28-33, p.20(2007).
- 3) [http://www.shindengen.co.jp/product/semi/pdf/J531\\_gijutsu.pdf](http://www.shindengen.co.jp/product/semi/pdf/J531_gijutsu.pdf) (Visited on 2014.9.25).