

Ag/Bi2223 高温酸化物超電導テープのPb-Snハンダによる接続抵抗

田 中 光 雄*・丸 山 浩 史**

Junction Resistance of Ag/Bi2223 Oxide Superconducting Tapes Using Pb-Sn Solder

Mitsuo Tanaka and Hirofumi Maruyama

Studies have been made on electric resistance of Pb-Sn soldered junction between silver-sheathed $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (Bi2223) tapes which are typical high temperature superconductor.

Junction resistance has been obtained decay of persistent current in the circuit which consists of superconducting coil and soldered junction.

Junction resistance decreases approximately in inverse proportion to junction length. However, when junction length is longer resistance becomes slightly larger. This result is considered that when junction length is short thickness of solder layer is thin and uniform, but junction length is long uniformity of solder layer thickness is lost.

These results have been confirmed by the cross-sectional photograph of soldered junction observed from EPMA.

1. 序論

超電導線材を用いてコイルを作製する場合、線材を接続しなければならないことが多い。特にパンケーキコイルなどの場合は接続部が多くなる。パンケーキコイルとは、バームクーヘンの様な単コイルを積層して、一つのコイルとしたものである。この時、単コイル間を接続する必要があるが、接続箇所は数カ所から十数カ所になる。接続部は通常、線材を重ね合わせてハンダで接続することが多いが、この時、接続部は抵抗を持つため、永久電流運転などではその電流減衰が問題になる。高温超電導線では、銀シースされたテープがよく用いられており、接続には Pb-Sn ハンダが用いられるのが一般的である。

本研究では、銀シースされた Bi-2223 テープを Pb-Sn ハンダを用いて接続した接続部の抵抗がどの程度になるかを検討したものである。

2. 実験に用いた超電導線材

今回の実験で用いた超電導線材は、幅 4.2mm、厚さ 0.22mm の $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (Bi-2223) 銀シーステープ線材であり、断面写真を図1に示す。


テープは極細化された超電導フィラメント 61 本が銀母材内部に埋め込まれたものであり、白い部分が銀、その中の黒い部分が、超電導フィラメントである。

図1 Bi-2223 超電導テープの断面写真

* 原子力技術応用工学科 ** 電気工学専攻大学院生

3. 理論検討

テープ線材の接続抵抗について、理論検討する。図2はテープを重ね合わせてハンダで接続した部分の模式図を示す。

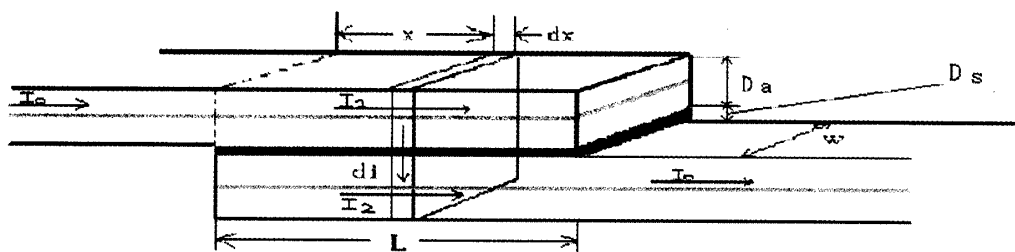


図2 接続部の模式図

簡単のため超電導フィラメントは銀母材で挟まれた超電導の薄板として模擬した。テープの幅を w 、テープの厚さを D_a 、ハンダ層の厚さを D_s 、接続長を L とする。接続の一方の端から距離 x の点での幅 dx の部分の抵抗を計算すると、次のようになる。

微小幅 dx の領域での超電導薄板間の抵抗 Δr は

$$\Delta r = \rho_a \frac{D_a}{wdx} + \rho_s \frac{D_s}{wdx} = \frac{\rho_a D_a + \rho_s D_s}{wdx} = \frac{k}{dx} \quad (1)$$

ここに、

ρ_a, ρ_s : 銀、およびハンダの抵抗率

D_a, D_s : 銀シーステープ、およびハンダ層の厚さ

である。

両超電導テープ間の電位差を V_0 とすると

$$-\Delta r \cdot dI_1(x) = \Delta r \cdot dI_2(x) = V_0 \quad (2)$$

$$-k \frac{dI_1(x)}{dx} = k \frac{dI_2(x)}{dx} = V_0 \quad (3)$$

これを解くと

$$I_1(x) = -\frac{V_0}{k}x + C_1 \quad (4)$$

$$I_2(x) = \frac{V_0}{k}x + C_2 \quad (5)$$

境界条件より C_1, C_2 を求めると、

$$I_1(0) = I_0 \text{ より } C_1 = I_0 \rightarrow I_1(L) = 0 \text{ より } V_0 = \frac{k}{L}I_0 \quad (6)$$

$$I_2(0) = 0 \text{ より } C_2 = 0 \quad (7)$$

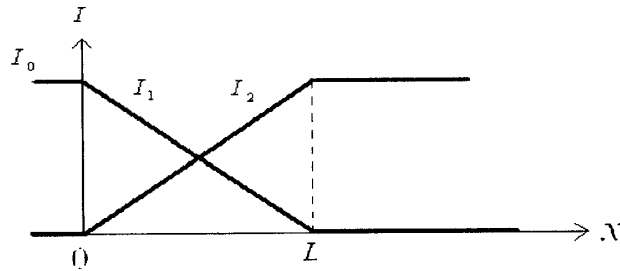
このことから

$$I_1(x) = I_0 - \frac{V_0}{k}x \quad (8)$$

$$I_2(x) = \frac{V_0}{k}x \quad (9)$$

を得る。

接続部の電流分布は、下図に示すように直線的に変化することになる。



接続抵抗を R とすると

$$R = \frac{V_0}{I_0} = \frac{k}{L} = \frac{1}{wL}(\rho_a D_a + \rho_s D_s) \quad (10)$$

ここで (10) 式に

$$w = 4.2 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$D_a = 0.22 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$D_s = 0.05 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\rho_a = 0.3 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$$

$$\rho_s = 3.4 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$$

の数値を入れて代入し接続抵抗を推定した。

w はテープ線材の幅で 4.2 mm、 D_a はテープの厚さで 0.22 mm、 D_s はハンダ層の厚さであるが、ここでは仮りに 0.05 mm とした。 ρ_a は銀母材の液体窒素温度での抵抗率を示し $0.3 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$ であった。これは、理科年表から調べた値である。 ρ_s は Pb-Sn ハンダの液体窒素温度での抵抗率を示し、 $3.4 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$ となったが、これはわれわれが実測したものである。

この数値をそれぞれ代入すると、接続長 1 cm のときの抵抗は $0.056 \mu \Omega$ となり、接続抵抗は接続長に反比例することが分かった。

4. 4 端子法による実験方法

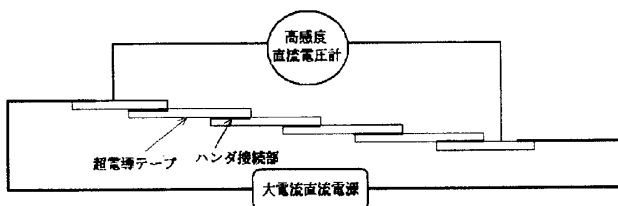


図 3 4 端子法による接続抵抗の測定回路

テープ接続部のオーバーラップ長を 1 cm、3 cm、6 cm とし、これを 5 ヶ所直列につないだものをそれぞれ製作し、線材の両端に電流リード線と、電圧リード線をハンダで接続したのち、液体窒素中に入れ、電流と電圧から抵抗を求めた。

5. 4端子法の実験結果及び考察

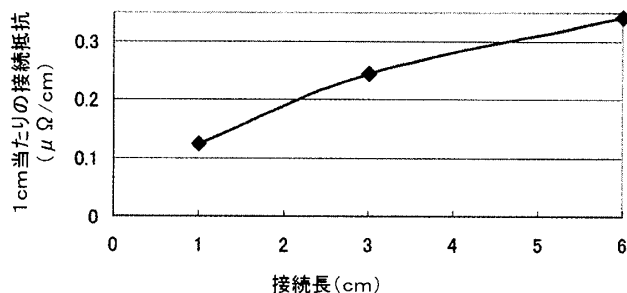


図4 接続長1cm当たりの接続抵抗

接続長1cm、3cm、6cmの場合の1cm当たりの接続抵抗を図4に示す。

高感度電子電圧計を用いて4端子法の実験を行い、各接続部1箇所当たりの抵抗を測定したが、電流を50Aまで流しても、抵抗が小さすぎ電圧が出ない部分もあった。これは高感度電子電圧計の電圧ドリフトが10数μVであるために、微少電圧測定に限界があり、測定精度がこのレベルの電圧では極めて悪い

と考えられる。このことから接続長1cmですら抵抗を十分な精度で測定できないのに、2cm、3cmオーバーラップになってくると、それぞれの抵抗は1cmオーバーラップさせたものの2分の1、3分の1となってくるため、さらに抵抗は小さい値になり、抵抗を測定することは困難になってきた。

このことから、4端子法の実験では正確なデータを検出することができないと判断し、より精度の高い測定が可能な永久電流の減衰から接続抵抗を求める方法を採用することにした。

6. 永久電流減衰による実験

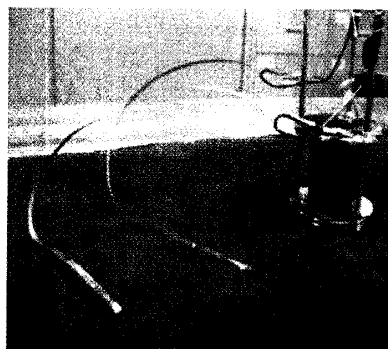
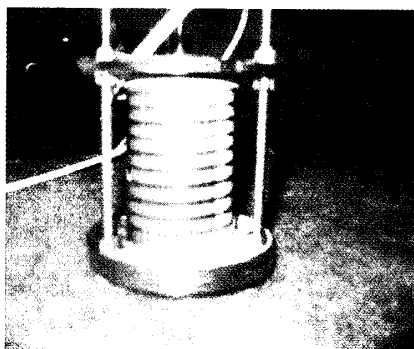


図5 実験に用いた超電導コイル

表1 コイル諸元

コイル内径	32.2mmφ
コイル外径	46.1mmφ
コイル長さ	60.7mm
総巻き数	218 ターン
層数	20 層
発生磁界	3.98mT/A
自己インダクタンス	0.91mH

図 5 に、永久電流減衰法の実験に用いたコイルの写真を示す。接続部を設けるために、コイルの両端は、約 50 cm ずつ余しておいた。コイルの諸元を表 1 に示す。

初めに、図 6 (a) のようにコイル巻き線の両端を接続せず、液体窒素から出しておき、コイルに 30 A の電流を流した。この時ホール素子で測定したコイル中心の発生磁界は、120 mT であった。

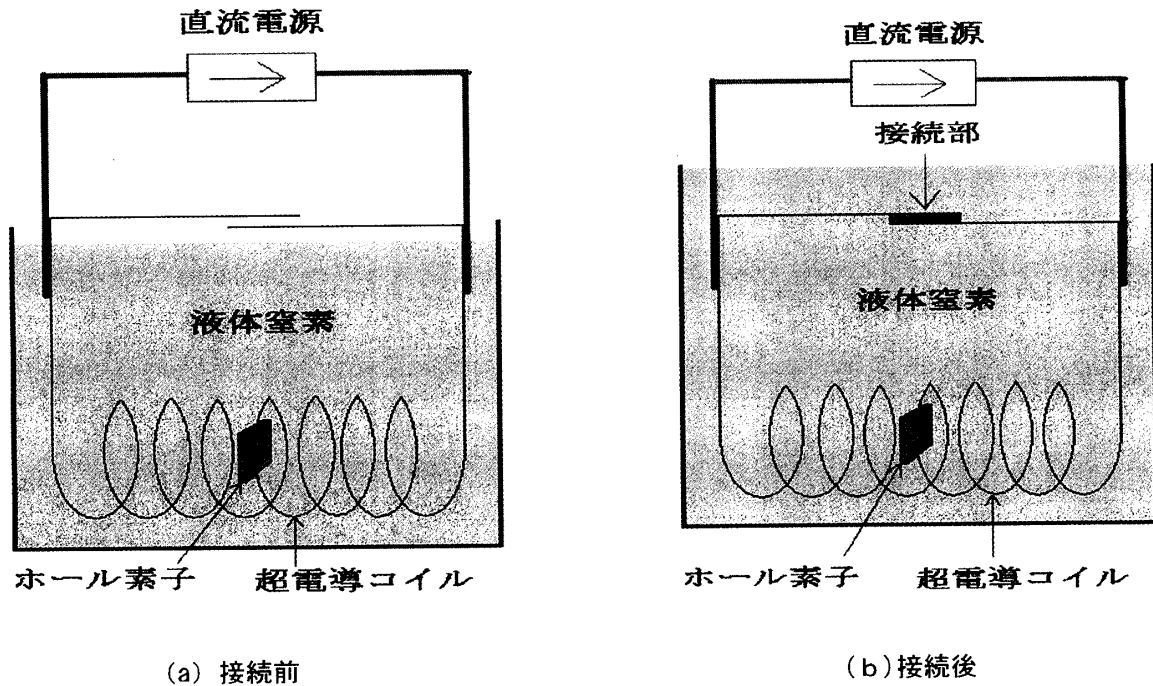


図 6 永久電流回路の形成法

次に図 6 (b) に示すように、コイルに電流が流れている状態で、コイル巻き線の両端をハンダ付けした後、接続部を液体窒素に浸漬し、次いで電源を徐々に落としていき 0 A にすると、コイルと接続部からなる回路に永久電流が流れる。この永久電流の減衰から接続抵抗を求める。永久電流はコイルに発生する磁界をホール素子で測定することにより求めた。

永久電流の減衰は

$$I = I_0 \exp(-t/\tau) \quad (11)$$

のように指数関数的に減衰する。ここで τ は減衰の時定数を示し、時定数 τ は L/R で表される。 L は超電導コイルの自己インダクタンス、 R は接続抵抗である。

7. 永久電流減衰法の実験結果

次に接続長を 1 cm から 10 cm で変化させた場合の永久電流の減衰特性を図 7 に示す。

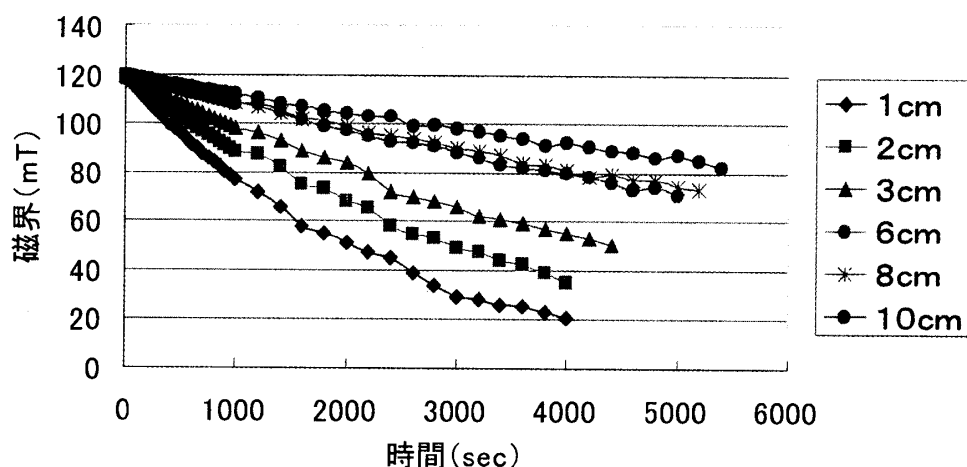


図7 接続長を変えた場合の永久電流の減衰特性

図7から減衰の時定数 τ を求め、接続抵抗を求めた。

その結果を表2に示す。接続長が長くなればなるほど、接続抵抗が小さくなることが分かる。この減少の度合いが接続長に反比例して、小さくなっているのかどうかを調べるために1cm当たりの接続抵抗に換算したグラフを図8に示す。

表2 接続長と接続抵抗

接続長 (cm)	接続抵抗 ($\mu\Omega$)
1	0.394
2	0.271
3	0.177
6	0.089
8	0.082
10	0.059

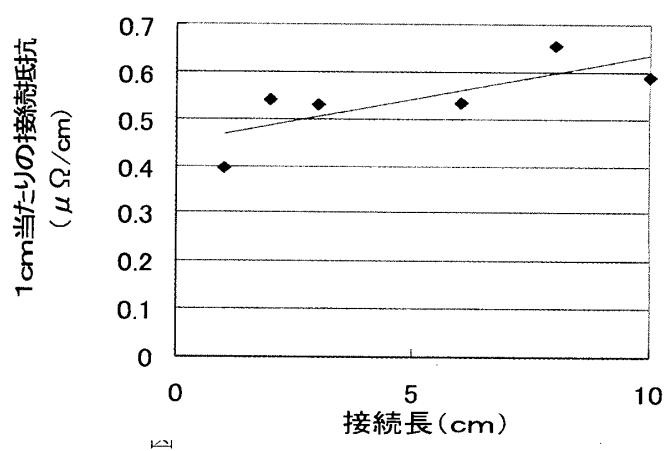


図8 接続長1cm当たりの接続抵抗

図8を見ると、1cm当たりの接続抵抗は接続長が長くなればなるほど僅かずつ大きくなることが分かる。即ち、接続抵抗は接続長に反比例しておらず、僅かに大きくなる。これを考察するために接続部の断面写真を電子線マイクロアナライザ (EPMA) で撮ったものを図9、図10、図11に示す。

図9の写真を見れば分かるように、接続長が1cmの場合ではハンダ層の厚さは薄く、どの部分でも一様であるのに対し、図10に示すように、接続長が10cmの場合は、ハンダ層が厚くなっている部分もあり、図

11のように、所によっては、剥離部のある部分もあった。このため1cm当たりの接続抵抗は接続長が長くなれば少しずつ大きくなったものと思われる。

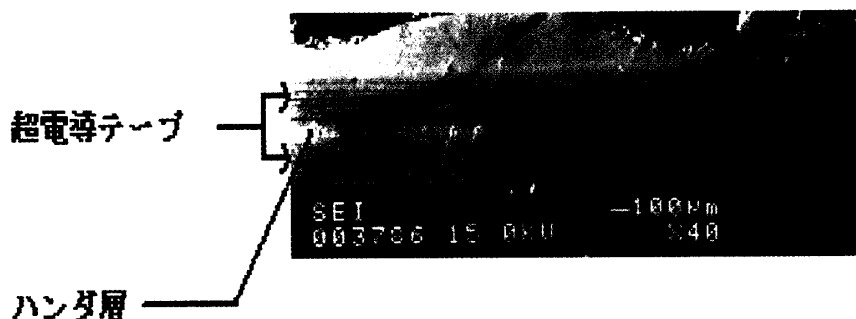


図9 接続長1cmの断面写真

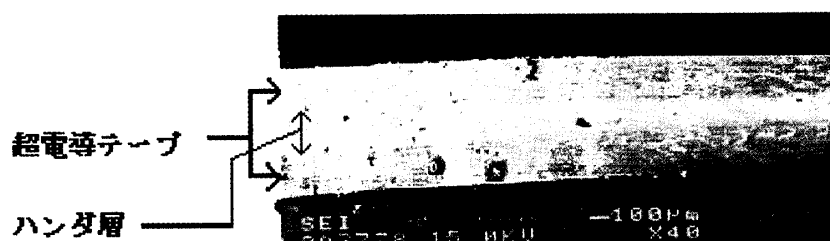


図10 接続長10cmの断面写真(1)

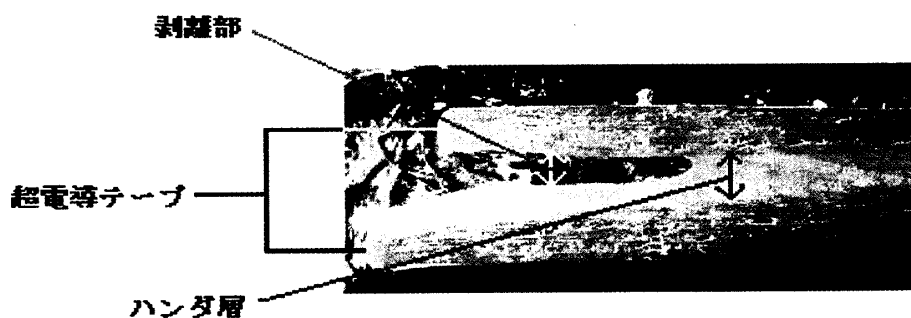


図11 接続長10cmの断面写真(2)

8. 考察

理論的には接続抵抗は接続長に反比例して小さくなるはずであるが、本実験からは、図8から分かるように、接続長が長くなると、1cm当たりの接続抵抗は少しずつ大きくなることが分かった。これは、接続長が長くなるほどハンダ層の厚さの均一度が悪くなるためであると考えられる。これを確かめるため、E PMAによる接

続部の断面写真を撮ったが、接続長が長くなると、ハンダ層の均一性が失われることが判明した。今回はハンダ鋺を使用し手作業で線材を接続したため、これらの問題が生じたが、接続部を形成するための特別な治具を使用すれば、接続長が長くなっても、ハンダ層の厚さは均一になり、接続抵抗は接続長に反比例して小さくなるものと考えられる。

ここで、実際のコイルを作製した場合の永久電流の減衰について考察してみる。例えば、本実験で用いた Bi2223 テープを用いて、内径 20cm、外径 30cm の単コイル 10 個を積層したパンケーキコイルについて考える。この場合、接続部は、内側、外側合わせて 20 箇所になるが、接続部のオーバーラップ長を仮に 6cm とすると、トータルの接続抵抗は、表 2 を参照すれば $0.09 \times 20 = 1.8 \mu \Omega$ となる。また、このコイルの自己インダクタンスは、総巻数を 4,000 ターンとすると、概略 5 H となる。このことから、このコイルを永久電流運転したときの減衰時定数は約 $2.2 \times 10^6 \text{ sec}$ となり、24 時間連続運転したときの電流減衰は、約 4 % 程度となることが分かる。

9. まとめ

Bi2223 高温酸化物超電導テープを Pb-Sn ハンダで接続した場合の接続抵抗を、永久電流の減衰特性から推定した。接続抵抗は、1 cm あたり約 $0.4 \mu \Omega$ となり、実用上、コイルの運転には差し支えない程度の値になることが分かった。

参考文献

- 1) 田中光雄, 本田将之: 福井工業大学研究紀要 第 29 号 (1999) P67
- 2) 小沼稔ほか: 超電導材料と線材化技術 (1995)
- 3) 荻原宏康: 超電導材料 (1989)
- 4) 社団法人低温工学協会: 超電導・低温工学ハンドブック (1993)
- 5) 山村昌ほか: 超電導工学 (1990)
- 6) 小山健一: 超電導技術 (1988)
- 7) 藤田敏三、立木晶: 高温超伝導の科学 (1999)

(平成 20 年 3 月 31 日受理)