研究論文

ビスマス系銀シース多芯テープ超電導線材の 常電導伝播特性

金 錫 範, 石山 敦士, 岡田 秀彦*, 野村 俊自*

早稲田大学理工学部電気電子情報工学科 東京都新宿区大久保 3-4-1

* 東芝研究開発センター 川崎市川崎区浮島町 4-1

(1996年3月12日受理)

Normal-Zone Propagation Properties in Bi-2223/Ag Superconducting Multifilamentary Tapes

SeokBeom KIM, Atsushi ISHIYAMA, Hidehiko OKADA* and Syunji NOMURA*

Department of Electrical, Electronics and Computer Engineering, Waseda University, 3-4-1 Ohkubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169

* Toshiba Research and Development Center, 4-1 Ukishima-cho, Kawasaki-ku, Kawasaki 210

(Received March 12, 1996)

Synopsis:

It is expected that the normal-zone propagation of high-temperature superconductor (HTS) is slower than that of low-temperature superconductor (LTS) because of its large heat capacity. If the normal-zone propagates too slowly, hot spots will develop, possibly resulting in permanent conductor damage. Accordingly, it is necessary to measure propagation for designing of HTS magnet quantitatively. This paper describes electromagnetical and thermal behaviors during normal transition in Bi-2223/Ag superconducting multifilamentary tapes by conduction cooling. Some experiments were carried using operating temperature, 10–40 K, and transport current as parameters in zero magnetic field. Sample tapes are transmitted normally with heater to initiate a quench. The voltage and temperature properties which accord with a normal transition are measured by voltage taps and thermocouples attached to sample tapes, and we also calculated longitudinal and transverse directions normal-zone propagation velocities from the voltage traces. In the case of conduction cooling, we investigate the cooling effect due to the length of the sample tape because its cooling condition is different from the case of using a coolant, for example liquid helium.

Keywords: Bi-2223/Ag superconducting tape, conduction cooling, normal-zone propagation velocity, quench, HTS & LTS

1. はじめに

酸化物線材の常電導転移時の振る舞いは、高い運転温度や線材を構成する材料の違いから、金属系(低温)線材の場合とかなり異なることが予想される¹⁾。その特性について実験的に検証した例は非常に少ない。本論文の対象である冷凍機による伝導冷却の場合は、液体ヘリウムなどの冷媒による冷却と冷却条件も異なる。

そこで筆者らは、伝導冷却方式の酸化物超電導コイルを想定し、ビスマス系銀シース単芯テープ超電導線材について、運転温度 (GM 冷凍機による伝導冷却) と通電電流をパラメータとして線材長手方向への常電導伝播特性の測定を行ってきた^{2,3)}。また、これと並行して試みた3次元有限要素法解析結果について報告してきた⁴⁾。

本論文では、ビスマス系銀シース多芯テープ超電導

Table 1 Parameters of sample tape.

Oxide	(Bi, Pb) ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _x
Material of matrix	Silver
Ratio of silver	2.75
Number of filaments	55
Critical temperature	105 K
Thickness	0.25 mm
Width	3.50 mm
Cross-sectional area	0.87 mm ²

線材を試料として、GM 冷凍機による伝導冷却時（運転温度 T_{op} : 10~40 K）の線材長手方向への常電導伝播速度（以下 V_l と略記）および常電導転移に伴う熱的特性について測定を行った。実際の超電導コイル内の常電導伝播特性を知るためには、線間方向への常電導伝播速度（以下 V_t と略記）のデータも必要となる。そこで、線間方向への常電導伝播特性についても同様の測定を行ったのでその結果を報告する。また、従来の金属系線材の常電導転移及び伝播特性と比較し、相異点を明らかにする。さらに、前報告の単芯テープ線材の実験結果³⁾と比較し、多芯化により常電導転移・伝播特性が改善されることを示す。

2. 実験

2.1 試料

実験に用いた試料は、幅 3.5 mm、厚さ 0.25 mm のビスマス系（2223 相）銀シース多芯テープ超電導線材である。試料の長さは線材長手方向の常電導伝播特性測定時は 50 cm、線間方向の常電導伝播特性測定時は 20~22 cm とした。試料の臨界温度 T_c は 105 K である。Table 1 に試料の諸元を示す。

2.2 線材長手方向の常電導伝播特性の測定

実験は、液体ヘリウムなどの冷媒を使用せずに、GM 冷凍機を用いた伝導冷却方式を採用し、試料の初期温度、すなわち、運転温度を制御した^{2~4)}。Fig. 1 に実験装置の概略を示す。試料は GM 冷凍機の 2 段ステージに持続されている銅のサンプルホルダの上に取り付けてある銅ブロックに電気的・熱的に接続した。試料は真空チャンパーの中に置かれているため、銅ブロックと接している部分以外の試料は断熱状態となる。運転温度は、銅ブロックに埋め込んである CGR 温度計により測定しつつ、2 段ステージとサンプルホルダに取り付けてあるヒータによって調節した。Fig. 2 に V_l を測定するための測定リードと擾乱用ヒータの配置を示す。試料は両銅ブロック間に接続されており、銅ブロックは電流リードと接合されてい

Fig.1 Schematic view of experimental setup which consists of GM cryocooler, sample tape installed on the sample holder contacted with a cold head and peripheral device for normal-zone propagation properties measurement.

Fig. 2 Schematic view of the BPSCCO/Ag sample tape, sample holder and heater for disturbance used for longitudinal direction normal-zone propagation properties measurement. $V_{12} \sim V_{56}$ are the voltages between the voltage taps. The carbon glass resistor, CGR, is employed to determine the operating temperature.

Fig. 3 Schematic view of the sample tapes, sample holders and heater for disturbance used for transverse direction normal-zone propagation properties measurement. V_{12} , V_{34} , V_{56} and V_{78} are the voltages recorded in this experiment.

る。強制的に常電導の芽を発生させるためのヒータは、試料の中間部分に取り付けた。試料がテープ状であるため、ヒータはひずみゲージを用い、試料の片面に取り付けた。これは、超電導コイル内の線材の動きや線材間摩擦などの外部擾乱を想定したものである。ヒータの常電導伝播速度測定への影響を減らすために、投入する熱量は最小クエンチエネルギー (MQE) に相当する値を選んだ。ヒータから 50 mm 離れた試料の上に常電導伝播速度と常電導転移時の温度上昇を測定するための電圧タップ (タップ間距離: 10 mm) と熱電対を取り付けた。発生電圧と温度はデジタルペンレコーダにより記録し, GPIB インタフェースによってコンピュータにデータを蓄積した (Fig. 1)。実験は、ヒータにより強制的に常電導転移させ、常電導部が伝播波及していく時に得られる各タップ間発生電圧から V_{θ} を評価 (評価法の詳細は後述) する。

2.3 線間方向の常電導伝播特性の測定

Fig. 3 に V_{θ} を測定するための測定装置の概略を示す。実験は超電導コイルを想定したものであるが、長手方向への伝播の影響をなくし、線間方向伝播特性のみを測定しようと試みたので図のように 4 本の長さ 20~22 cm の試料 (tape 1~4) を用いて行った。運転温度の制御は 2.2 節の場合と同じである。4 本の試料は 2.2 節に使われたサンプルホルダの上に取付けてある 5 つの銅ブロックに同じく電氣的・熱的に接続した。常電導転移に伴い試料に発生した発熱のうち線材長手方向へ伝播した熱は、電流リードとヒートシンクの役割を果たす銅ブロックに吸収される。ヒータを最も外側の試料 (tape 1) の中心部分に位置させて、2 つの FRP ($20 \times 40 \times 10 \text{ mm}^3$) で 4 本の試料と一緒に挟み密着させた。ヒータは、2.2 節と同様のひずみゲージを用いた。各試料の間には絶縁材として厚み

Fig. 4 Cross-sectional view of the center of sample tapes in Fig. 3 for transverse direction normal-zone propagation velocity measurement. The electrical insulators, $50\text{ }\mu\text{m}$ thickness, are inserted between the sample tapes of 4-layer. The heater for disturbance is attached to the surface of tape 1. The heater, sample tapes and insulators are cohered by FRP blocks. V_{t1} is the transverse direction normal-zone propagation velocity from tape 1 to 2.

Fig. 5 Electrical resistivities obtained from the experiment of $(\text{Bi, Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (single dashed) and sample tape (solid), and those of silver (dashed).

$50\text{ }\mu\text{m}$ のカプトンテープを挟み電氣的に絶縁した (Fig. 4)。密着した各試料の両側には電圧タップが取り付けられており、片方の電圧タップと同じ位置に熱電対を取り付けた。

実験は、ヒータにより強制的に常電導部の芽を作り、通電電流 I_t によるジュール発熱が発生し、Fig. 4 のように熱の伝播と共に常電導部が隣接試料に伝播していく過程を発生電圧および温度により測定した。 V_t は、常電導転移に伴い各電圧タップに発生した電圧より計算した (詳細は後述)。

Fig. 6 Plot of critical current I_c vs. temperature for sample tape, and the states of tape due to the transport current I_t . The difference of MQE size according to operating temperature for I_t .

3. 実験結果

超電導線材の伝播特性を正確に見積もるには、ヒータの影響、試料の長さや冷却条件などに注意する必要がある。また、酸化物線材の場合は高臨界温度のため、通電電流の一部が超電導体から銀に分流する電流分流領域が金属系線材に比べて非常に広い。そこで、その点についてまず実験結果を示す。その後、線材長手方向及び線間方向への常電導伝播特性の実験結果と単芯テープ線材及び金属系線材の場合との比較を順次行う。

3.1 抵抗率と電流分流

実験に用いた試料と酸化物超電導体 $[(\text{Bi, Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x]$ の臨界温度以上での抵抗率を測定した結果を Fig. 5 に示す。同図からわかるように、試料の臨界温度 105 K 以上の温度領域では $(\text{Bi, Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ の抵抗率が銀より 4 桁程度大きい。Fig. 6 で示すように試料の温度が臨界温度を越えると、試料に流れる通電電流 I_t のほとんど全ては母材である銀に流れる ($I_t = I_{\text{matrix}}$)。Fig. 6 には、今回実験から求めた各運転温度での試料の臨界電流値と通電電流 I_t 及び温度の関係を示す。複合超電導線材の場合、通電電流 I_t に対して線材の温度により Fig. 6 のように超電導状態と電流分流状態、常電導状態の 3 つの状態が存在する。超電導状態 ($T < T_{cs}$) では通電電流の全ては超電導体流れ ($I_t = I_{\text{super}}$, $I_{\text{matrix}} = 0$)、常電導状態 ($T > T_c$) ではほとんど全て母材の銀に流れる ($I_t = I_{\text{matrix}}$, $I_{\text{super}} = 0$)。また、試料の温度が電流分流領

Fig. 7 Temperature distributions of longitudinal direction for high-temperature and low-temperature composite superconductors.

域 ($T_{cs} < T < T_c$) では、超電導体に流れる通電電流は温度上昇に応じて銀に分流する ($I_t = I_{super} + I_{matrix}$)。酸化物線材の場合は、臨界温度 T_c が金属系線材より遥かに高いため、線材長手方向への電流分流領域は金属系線材の場合より非常に広い。これに従い、電流分流も金属系線材に比べて非常に広い温度領域で起きる。複合超電導線材が常電導伝播する際の伝播先端部 (ノーマルフロント部) の温度分布の概略を Fig. 7 に示す。図からわかるように、金属系線材 (LTS) の場合は、電流分流領域における線材長手方向の温度勾配は急激であり、その空間的長さも酸化物線材 (HTS) に比べて無視できるほど短くなる。従って、金属系線材の場合は、壁のような温度勾配を持つノーマルフロント部が速い速度で線材長手方向へ伝播していく。しかし、その壁の温度差は約数 K である。それに対して、酸化物線材の場合は、高臨界温度のため、電流分流領域の温度差が金属系の場合より非常に大きく (数十 K)、空間的長さも遥かに長くなる。また、線材長手方向へのノーマルフロント部の温度勾配は金属系の場合に比べ、非常に緩やかになっており、このような先端部の温度分布は遅い速度で線材長手方向へ伝播していく。Fig. 8 に通電電流 I_t における酸化物と金属系線材に生じる自己ジュール発熱を示す。一般的に用いられている銅母材の抵抗率は 25 K 以下ではほぼ一定であり、25 K 以上で温度とともに変化する。このような母材の抵抗率の温度依存性は、ジュール発熱に大きな影響を与える。従って、25 K 以下で運転する金属系線材の発熱は、電流分流領域では温度とともに直線的

Fig. 8 The heat generation vs. temperature plots with transport current I_t for high-temperature and low-temperature composite superconductors.

(温度に応じて電流が母材に分流していくと一般には仮定)^{5,6)}に発生し、その傾きは臨界温度以上 25 K までは一定になる。しかし、25 K 以上で運転する酸化物線材の場合、母材の抵抗率が温度依存性を持つようになるため、この領域でのジュール発熱は Fig. 8 のように曲線状になる。以上のように、数 K の温度によって電流分流する金属系の場合は、その長手方向への電流分流領域の空間的長さは非常に短く、線材は超電導状態から常電導状態へ素早くジャンプする。しかし、酸化物の場合は、臨界温度と分流開始温度との差が金属系に比べて非常に大きく、その空間的長さも非常に長くなる (Fig. 7) ため、常電導転移時の振る舞いは金属系線材の場合とかなり異なってくる^{1,6)}。以下、これらの点を実験的に検証した。

3.2 長手方向の常電導伝播特性

(1) 長手方向の常電導転移時の電圧・温度特性

V_L 測定時に得られた、常電導転移に伴うタップ間発生電圧と温度上昇を Fig. 9 と Fig. 10 に示す。両図は、運転温度 20 K と 30 K の時、それぞれ通電電流 55 A 通電した時の測定データである。Fig. 9 において、ヒータにより熱擾乱が投入された後、通電電流による発熱が発生し、試料の温度は緩慢に上昇する。この緩慢な温度上昇と共にタップ間電圧も緩やかに発生する。試料の温度が上昇するに従って分流電流も増加し、ジュール発熱も大きくなり、温度上昇と発生電圧の変化も徐々に急激になる (図中の “current sharing region”)。試料の温度が臨界温度 105 K を越えると、ほとんど全ての通電電流は銀に分流し、その点 (図中 “full normal” と記した点) で発生電圧曲線は変曲点を持ち、その後銀の抵抗率の温度変化に従ってほぼ直線的に上昇する。電圧曲線でタップ間の全てが常電

Fig. 9 The voltage and temperature traces with a transport current of 55 A, I_t/I_c 0.748, at operating temperature of 20 K. The voltage traces V_{12} - V_{56} are the voltage between the voltage taps, and temperature traces T_1 - T_5 are the temperatures of tape measured by thermocouples T_{e1} - T_{e5} shown in Fig. 2.

導状態に転移する時間の温度をみると臨界温度である 105 K と一致した。Fig. 10 の運転温度 30 K の場合、常電導転移させるために投入した熱量は 5.10 J であるのに対して、20 K の場合 (Fig. 9) は、同じ通電電流に対し 6.93 J を投入した。これは、Fig. 6 で示したように、同じ通電電流に対しては、運転温度が低い方が温度マージンが大きいためである。逆に運転温度が高い場合は、温度マージンが小さくなるので、分流開始温度 T_{cs} まで至る時間も短くなりタップ間電圧が発生する時間も 20 K の場合より早くなる。通電電流を切ると同時にタップ間電圧は 0 になるが温度は伝導冷却のために徐々に初期温度に戻る。

ここで、金属系線材の場合の常電導伝播特性と比較するために、Fig. 11 に Nb_3Sn/Cu 線材 (直径 0.9 mm, 銅比 1.0) を用いて V_{θ} を観測した時に得られたタップ間発生電圧の観測例³⁾を示す。図から常電導転移に伴う発生電圧は、3.1 節で述べたとおり直線的に上昇し、タップ間の領域全てが常電導転移した後は

Fig. 10 The voltage and temperature traces with a transport current of 55 A, I_t/I_c 0.948, at operating temperature of 30 K. The voltage traces V_{12} - V_{56} are the voltage between the voltage taps, and temperature traces T_1 - T_5 are temperatures of tape measured by thermocouples T_{e1} - T_{e5} shown in Fig. 2.

母材の銅の抵抗率の温度依存性に従って電源が off するまで上昇する。酸化物線材は V_{12} と V_{23} を見た場合、 V_{12} の領域が全て常電導状態となったとみられる時刻 (15.2 s) において、 V_{23} 領域ではすでに電流分流状態に入った部分があり、電圧が発生している。これに対して金属系の場合は、 V_{12} が常電導状態を示したと同時に次の V_{23} が上昇を開始しており、両者の常電導伝播特性には大きな違いがある。

次に単芯酸化物線材との比較を行うため、ビスマス系銀シース単芯テープ超電導線材の常電導転移に伴う発生電圧と温度上昇の様子を Fig. 12 に示す³⁾ (試料の諸元は、銀比 1.41, 運転温度 10 K, 通電電流 35 A, ヒータ投入量 14.6 J)。ここで、 T_1 は電圧タップ V_1 と V_2 の間の線材温度であり、 T_2 - T_5 は同じく V_2 - V_6 の間の線材温度である。単芯酸化物線材の場合は、その断面構造より、熱がこもりやすいことから線材が焼損しやすい。実際、実験中にホットスポットの温度により試料が数回焼き切れた³⁾。従って、単芯の場合は試料の測定領域のすべてが常電導転移するまでの時

Fig. 11 Typical voltage traces and transport current in longitudinal direction for low-temperature superconductors, LTS, ($\text{Nb}_3\text{Sn}/\text{Cu}$).

間、常電導伝播特性を観測できず、その前に電源を切っている。図から、単芯の場合が多芯の場合 (Fig. 9, 10) に比べ温度上昇率が高く、試料長手方向の温度勾配も大きくなっていることがわかる。これは、構造的な問題によって多芯の場合より熱掃けが悪いことに起因したものである。このような温度上昇特性とともに電圧の上昇率も大きくなっている。以上の結果から、線材を多芯化することによって機械的強度が強くなるだけではなく、熱掃けがよくなり、熱的安定性も高くなることを確認した。

常電導伝播速度は常電導転移によって生じる自己ジュール発熱の熱拡散と共に常電導部が広がっていく時の速度である。従って、常電導伝播速度を測定する際には、ヒータの影響について調べておく必要がある。酸化物線材の場合は、金属系に比べ温度マージンが大きく、大きな熱容量を有しているので常電導部の芽をつくるために必要とするヒータの熱量は、金属系線材の場合より3桁ほど大きくなる¹⁾。例えば、参考文献1)では、 $I_t/I_c=0.9$ の通電電流通電時に線材を常電導転移させるために要求されるMQEは、 $\text{NbTi}=0.001\text{ }\mu\text{J}$ 、 $\text{Nb}_3\text{Sn}=0.02\text{ }\mu\text{J}$ 、酸化物超電導体 $=3.4\text{ }\mu\text{J}$ である。また、発生電圧から常電導伝播速度を評価する際には、タップ間の温度差によって生じる熱起電力(ゼーベック効果)の影響も調べる必要がある^{2,3)}。上述したように、多芯化することによって単芯の場合より熱掃けがよくなり、試料長手方向への温度勾配が小さくなるため、熱起電力の影響は単芯の場合より減少しほとんど無視できるものと思われる。

(2) 長手方向の常電導伝播速度の評価

V_ℓ を求める際、金属系線材の場合は、Fig. 11のよ

Fig. 12 The voltage and temperature traces with a transport current of 35 A, I_t/I_c 0.437, at operating temperature of 10 K in a Bi-2223/Ag superconducting single core tape.

うに常電導転移に伴う電圧の発生が直線的になるため、隣り合うタップ間の電圧の立ち上がり時間の差を用いて計算することができる [Fig. 11 で $V_\ell=(\text{タップ間距離})/(\Delta t)^{7,8)}$ 。あるいは、電圧曲線の上昇率から速度を計算することもできる。しかし、酸化物線材の場合は、常電導転移に伴って発生する電圧が非常に緩やかとなるため (Fig. 9, 10), 常電導伝播速度の計算の仕方によってその評価が異なってくる。そこで、ここでは、1 cm 当たりのタップ間発生電圧が 1 mV 時の時刻を用いた場合と試料温度が臨界温度になった時の時刻を用いた場合について V_ℓ の評価を行った。すなわち、 V_ℓ を次のように求めた。まず、電圧タップ 1, 2 間の常電導伝播速度 $V_{\ell 1}$ は式 (1) のように求められる。

$$V_{\ell 1} = \ell_{12} / \Delta t \quad (1)$$

ここで、 ℓ_{12} は電圧タップ 1 から 2 までの距離、 Δt は電圧タップ 1, 2 間の発生電圧 V_{12} が 1 mV 時の時刻と電圧タップ 2, 3 間の発生電圧 V_{23} が 1 mV 時の時刻との時間差、または、試料の温度が臨界温度になった時の時間差である。 $V_{\ell 1}$ はヒータの影響が含ま

Fig. 13 The longitudinal direction normal-zone propagation velocity, V_l , of sample tape as a function of operating temperature (10–40 K). V_l is calculated from the time corresponding to the voltage between taps, 1 mV.

れている恐れがあるため、 V_l は、 V_{l2} , V_{l3} , V_{l4} の平均値を採用した。1 cm 当たりのタップ間発生電圧が 1 mV 時の時刻を用いて求めた V_l を Fig. 13 に、臨界温度になった時刻を用いて求めた V_l を Fig. 14 に示す。両図から、同じ通電電流に対しては運転温度が高い場合の V_l が速くなっている。これは、Fig. 6, 9, 10 で述べたように運転温度が高い方が温度マージンが小さいためである。Fig. 13 で V_l は 0.5~1.5 cm/s, Fig. 14 では 1.0~2.0 cm/s であり、臨界温度になった時刻を用いて求めた V_l が約 2 倍くらい速くなった。しかし、いずれの場合も、金属系線材の V_l より 1~3 桁遅く、この値は参考文献 1) で計算された予測値と桁的によく一致している。また、今回の測定範囲 (10~40 K) においては、 V_l の運転温度依存性はそれほど大きくない。この理由は、運転温度が高くなると、それだけ温度マージンが小さくなり速度が上昇することになるが、熱容量が逆に大きくなるため大幅な速度上昇とはならないためと考えられる。このような、常電導伝播速度を評価する時間内で試料の両端の温度上昇は見られなく、温度上昇率から逆算した結果、伝播速度の評価に端部効果、すなわち、試料長さの影響は含まれていなかったと判断した。

3.3 線間方向の常電導伝播特性

(1) 線間方向の常電導転移時の電圧・温度特性

本来なら臨界電流 I_c 以下の通電電流を通電した時の測定が望ましいが、今回の線間方向への常電導伝播特性の測定では、通電電流によるジュール発熱と、伝導冷却による冷却効果及び線間方向への熱掃けとのか

Fig. 14 The longitudinal direction normal-zone propagation velocity, V_l , of sample tape as a function of operating temperature (10–40 K). V_l is calculated from the time when tape temperature measured by thermocouples reach the critical temperature T_c , 105 K.

ねあいにより、臨界電流値以下の通電電流ではクエンチしなかった。実験に用いた試料の長さは 20~22 cm であり、長手方向への常電導伝播特性測定の場合より伝導冷却により冷却効果は大きくなっている（実験装置の空間的制約などから試料の長さを十分とることができなかった）。

結果の一例として、運転温度 20 K、通電電流 60 A ($I_t/I_c=1.15$) を通電した時に得られた発生電圧と温度を Fig. 15 に示す。投入したヒーターの熱量は、15.1 J であり、長手方向への常電導伝播特性測定時と同じ運転温度、通電電流（ただし、試料の長さは 50 cm）に投入した 6.02 J より約 3 倍大きくなっている（両者ともできるだけ MQE に近い値を投入した）。擾乱投入後 T_1 の温度は 60 K まで達していることから、ヒータが取り付けられている試料の中心部分 (Fig. 3) の温度は 60 K より高いことが予想できる。しかし、臨界電流以上の電流を通電し、さらに長手方向への常電導伝播特性の測定の場合より 3 倍程度の擾乱を投入したにもかかわらず、Fig. 15 の例では初期状態に回復した。このことは、通電電流により試料に発生したジュール発熱より、線間方向への熱伝導と伝導冷却による冷却効果が上回り初期状態へ回復したと考えられる。従って、Fig. 3 のような測定装置で試料をクエンチさせるためには、より大きい通電電流、或いは擾乱が必要となった。常電導転移した結果の一例を Fig. 16 に示す。Fig. 16 は、運転温度 30 K、通電電流 80 A ($I_t/I_c=2.16$) 通電時に得られた結果である。上記

Fig. 15 The voltage and temperature traces with a transport current of 60 A, I_t/I_c 1.15, at an operating temperature of 20 K. The voltage traces V_{12} - V_{78} are the voltage between the voltage taps, and temperature traces T_1 - T_4 are the temperatures of tapes measured by thermocouples T_{c1} - T_{c4} shown in Fig. 3.

Fig. 16 The voltage and temperature traces with a transport current of 80 A, I_t/I_c 2.16, at operating temperature of 30 K. The voltage traces V_{12} - V_{78} are the voltage between the voltage taps, and temperature traces T_1 - T_4 are the temperatures of tapes measured by thermocouples T_{c1} - T_{c4} shown in Fig. 3.

したように線間方向への常電導伝播特性測定時には、臨界電流値 (37 A) 以下の通電電流ではクエンチしなかったため、得られた V_t は臨界電流以上の通電電流による結果である。臨界電流以上の電流を通電するため、3.1 節で述べたように試料の銀シース部には通電と同時に分流電流 ($=I_t - I_c$) が流れ、ジュール発熱が発生する。すなわち、Fig. 15, 16 の実験において、ヒータ投入前の初期状態 (臨界電流以上の電流が流れている状態) ですでに試料は電流分流状態にある (Fig. 6)。しかし、発生したジュール発熱は、伝導冷却による冷却効果とのバランスによって常電導部は揺らぎ、温度上昇も生じないという平衡状態にあり、従って発生電圧値も一定に保たれる。線間方向への常電導伝播特性の測定は、このような初期状態のもとで、ヒータによる擾乱を投入してその後の特性を観測したものである。Fig. 16 の電圧曲線から、タップ間発生電圧は臨界電流を越える分の電流によるジュール発熱によって初期状態 (Time=0) で電圧は ~ 0.83 mV 発

生している。また、試料の初期温度は 30.5 K (試料に取り付けてある熱電対による値) であり、運転温度より 0.5 K 上昇しているが、銅ブロックの温度は 30 K (銅ブロックに埋め込んである CGR による値) であった。電圧タップ 1, 2 間の発生電圧 V_{12} は、ヒータによる擾乱が加わっている間には上昇するが、擾乱が終わると同時に一旦下がる傾向を示す。これは、擾乱により試料 1 (tape 1) に投入された熱とジュール発熱によって温度が上昇し、発生電圧も上昇するが、擾乱が終わると通電電流によるジュール発熱のみとなり、熱の拡散と共に温度が下降したためと考えられる。このヒータによる熱は隣接線に伝播し、その影響は小さくなるが試料 2, 3, 4 (V_{34} , V_{56} , V_{78}) の順に現われる。このようなヒータの影響は常電導伝播速度を判定する際に望ましくないことである。しかし、酸化物線材の場合は、MQE が大きいので必要となる擾乱熱量が大きくなることと、テープ状試料のため、線間方向にも熱拡散しやすいこと、それに対して、試料

Fig. 17 Typical voltage traces along the 4 turns as a function of time showing the transit time in the transverse direction for LTS ($\text{Nb}_3\text{Sn/Cu}$).

数（今回は4本）に限られていたことなどにより、ヒータの影響が少なからず含まれてしまった。電圧発生は3.2節の(1)と同様緩慢に上昇する傾向を示している。温度曲線はヒータ（試料の中心）から離れているところ（Fig. 3）の測定温度であるため、試料中心部分の温度は Fig. 16 の温度より若干高いと思われる。

ここで、金属系線材の線間方向への常電導伝播特性と比較するために、Fig. 11 の長手方向への常電導伝播と共に観測された線間方向への常電導転移に伴う発生電圧を Fig. 17 に示す⁸⁾。発生電圧は Fig. 11 の長手方向伝播の場合と同じ特性、すなわち、各試料の常

電導伝播に伴う発生電圧が直線的に上昇する傾向（このとき、各試料のタップ間の電圧は、試料の長手方向の常電導伝播に伴って変化している）と、タップ間の領域が全て常電導転移した瞬間に変曲点を持ち、その後は母材の抵抗の温度依存性によって上昇していくという特性を示した。このような特性を示す理由は Fig. 11 で述べたとおりである。

(2) 線間方向の常電導伝播速度の評価

V_t は3.2節(2)と同様、1 cm 当たりのタップ間発生電圧が 1 mV 時の時刻と、熱電対が取り付けられている（Fig. 3）点の試料温度が臨界温度になった時刻を用いて評価した。試料の V_t を Fig. 18, 19 に示す。 V_t は、Fig. 4 のような各試料間常電導伝播速度 V_{t1}, V_{t2}, V_{t3} のうち V_{t2}, V_{t3} の平均値として求めた。 V_t は、 V_ℓ の場合とは逆に臨界温度になった時刻を用いて求めた V_t の値（Fig. 19）が 1 mV になった時刻を用いて求められた値（Fig. 18）より遅くなっている。これは 1 mV を基準とした場合、ヒータの影響がより大きかったためと考えられる。今回の実験で得られた V_t は 0.02~0.08 cm/s であり、 V_ℓ より 1, 2 桁遅く、 $V_t/V_\ell \approx 0.04$ である。また、このような V_t は、テープ状の試料に比べ線材間の接線面が非常に小さい円形の金属系線材の V_t より 1, 2 桁遅い。今回の実験結果は、定常的な常電導伝播速度、すなわち、自己ジュール発熱による温度変化に伴って常電導部が波及していく速度を正確に計測したものとは言い難いが、擾乱発生点付近の速度と考えれば、定常的な伝播速度

Fig. 18 The transverse direction normal-zone propagation velocity, V_t , of sample tape as a function of operating temperature (10–40 K). V_t is calculated from the time corresponding to the voltage between taps, 1 mV.

Fig. 19 The transverse direction normal-zone propagation velocity, V_t , of sample tape as a function of operating temperature (10–40 K). V_t is calculated from the time when tape temperatures measured by thermocouples reach the critical temperature T_c , 105 K.

Table 2 Comparison of normal-zone propagation velocities for NbTi/Cu⁷⁾, Nb₃Sn/Cu⁸⁾ and BPSCCO/Ag conductors.

	NbTi/Cu	Nb ₃ Sn/Cu	BPSCCO/Ag
Dimension	0.96 mm ϕ	0.9 mm ϕ	3.5 $\times$ 0.25 mm
Cross-sectional area (mm ²)	0.74	0.63	0.87
Thickness of insulation (mm)	0.03	0.1	0.05
Ratio of matrix	2.0	1.0	2.75
Operating temperature (K)	4.2	4.2	10–40
Coolant type	L. He	L. He	Cryocooler
Transport current (A)	50–200	50–200	27–100
External magnetic field	0	0	0
V_ℓ (cm/s)	170–800	50–180	0.5–2.0
V_t (cm/s)	1.25–4.0	0.5–1.8	0.02–0.08
V_t/V_ℓ	~ 0.007	~ 0.01	~ 0.04

Fig. 20 The applied heating pulse in each experiment at an operating temperature of 10 K.

は今回の測定値以下ということになる。

試料及び金属系線材 (NbTi/Cu⁷⁾, Nb₃Sn/Cu⁸⁾ の諸元と V_ℓ , V_t を比較したものを Table 2 に示す。前述したように Table 2 の NbTi/Cu と Nb₃Sn/Cu 線材の V_t は、線材が円形であるため、線材間の接界面がテープ状の試料より遥かに小さい。従って、NbTi/Cu と Nb₃Sn/Cu 線材をテープ状にして V_t を求めた場合は、Table 2 の V_t より速くなると考えられる。Table 2 の結果は、金属系及び酸化物線材において理論的に求めた計算結果と桁的によく一致している¹⁾。

3.4 擾乱用ヒータ投入量の比較

最後に、伝導冷却運転で試料の構造と長さが異なる場合のヒータの投入熱量 (MQE 相当) を Fig. 20 に示す (運転温度 10 K)。各試料は、ビスマス系銀シー

ステープ超電導線材であり、次のとおりである。

Sample A: 単芯, 長さ 20 cm, V_ℓ 測定時

Sample B: 多芯, 長さ 20 cm, V_ℓ 測定時

Sample C: 多芯, 長さ 50 cm, V_ℓ 測定時

Sample D: 多芯, 長さ 20~22 cm, V_t 測定時

図から同じ長さの場合は (A と B の比較), 多芯の場合の投入熱量が単芯の場合よりはるかに大きい。このことは、前述したように、多芯化することによって熱的安定性が高くなることを表している。次に、同じ多芯線材の場合は (B と C の比較), 長い試料 (C) の投入熱量が小さくなることから、伝導冷却条件では試料の長さによって冷却効果が異なってくることがわかる。また、 V_ℓ と V_t の比較 (B と D の比較) では、D の方が熱量が大きい。これは、 V_t 測定時に投入された熱量は、試料長手方向のみならず線間方向の隣接試料にも伝導していくためである。従って、この試料を用いてコイル化する場合、常電導転移させるために必要となる擾乱の大きさはさらに大きくなる。

4. ま と め

ビスマス系銀シー多芯テープ線材を試料として、冷凍機を用いた伝導冷却運転時の試料の長手方向と線間方向への常電導伝播速度および常電導転移に伴う電氣的・熱的振る舞いについて実験を行った。得られた主な結果は次のとおりである。

(1) ビスマス系銀シー多芯テープ超電導線材の電流分流通領域は金属系線材の場合に比べて非常に広く、その領域での常電導転移に伴う温度上昇と電圧発生は非常に緩慢な傾向を示す。また、常電導伝播速度を求

める際、その評価方法によって値が若干異なってくる。

(2) ビスマス系銀シース多芯テープ超電導線材を伝導冷却で運転させた場合、試料の長さによって冷却効果が異なる。また、多芯化することによって、機械的強度だけでなく、熱的安定性も高くなることが明らかになった。

(3) 実験で得られた試料長手方向常電導伝播速度 V_l は $0.5 \sim 2.0$ cm/s であり、金属系線材の場合より 1 ～ 3 桁遅い。また、線間方向への常電導伝播速度 V_t は $0.02 \sim 0.08$ cm/s であり、 V_l より 1, 2 桁遅く ($V_t/V_l \approx 0.04$)、金属系線材の V_t よりも 1, 2 桁遅い。

参 考 文 献

- 1) T. P. Sheahen: *Introduction to High-Temperature Superconductivity*, Plenum Press, New York and London (1994) 363, 365, 367
- 2) S. B. Kim, A. Ishiyama, et al.: Proc. 1994 Topical ICMC (1994) 295
- 3) 金 錫範, 石山敦士, 岡田秀彦, 野村俊自: 電気学会論文誌 A **116** (1996) 149
- 4) S. B. Kim, A. Ishiyama, et al.: IEEE Trans. Magn. (1996) to be published
- 5) L. Dresner: *Stability of Superconductors*, Plenum Press, New York and London (1995) 37
- 6) R. H. Bellis and Y. Iwasa: Cryogenics **34** (1994) 129
- 7) C. H. Joshi and Y. Iwasa: Cryogenics **29** (1989) 157
- 8) A. Ishiyama and Y. Iwasa: IEEE. Trans. Magn. **24** (1988) 1194