走査型ホール素子顕微鏡を用いたメートル級銀シース Bi2223 超電導テープ線材の非破壊診断

学生員 坂 元 周 作* (豊橋技術科学大学) 非会員 張 平 祥 (豊橋技術科学大学)
正 員 太 田 昭 男 (豊橋技術科学大学)

Non-Destructive Evaluation of Bi2223 Tapes Using a Scanning Hall Sensor Microscope

Shusaku Sakamoto, Student Member (Toyohashi University of Technology)

P. X. Zhang, Non Member (Toyohashi University of Technology)

Akio Oota, Member (Toyohashi University of Technology)

We constructed a scanning Hall-sensor microscope with an active area of $50\mu\text{m}\times 50\mu\text{m}$, which can be served as a simple tool for non-destructive evaluation for 1m lengths of Ag-sheathed Bi2223 tapes usable at 77 K. Using this equipment, we measured two-dimensional magnetic field profiles due to trapped currents in a remanent state on surfaces of the tapes with the mono-, 19-, 37- and 61- filaments of Bi2223 superconductor, and compared with the results for the distribution of critical currents (I_c) along a length direction. Except for the case of 19 filaments, all tapes were prepared by the conventional powder-in-tube method. In the case of 19 filaments, however, another kind of the tape was prepared by covering the filaments with insulating barriers from a practical point of view for AC use, and the result was compared with that for the conventional tape without barriers.

The monofilamentary tape shows the inhomogeneity in magnetic field profile due to weak links, which seems to be consistent with the I_c distribution along a length direction. An increase in filament number homogenizes both the magnetic field profile and the I_c distribution, but the tape with insulating barriers still remains the inhomogeneity in both the magnetic field profile and the I_c distribution. The respective tapes show a correlation between the magnetic field profile and the I_c distribution along a length direction, independent of the number of filaments and also of whether or not insulating barriers were introduced.

キーワード：銀シース Bi2223 超電導テープ、残留磁界、臨界電流、走査型ホール素子顕微鏡、非破壊診断

Keywords: Ag-sheathed Bi2223 tape, remanent magnetic field, critical current, scanning Hall sensor microscope, non-destructive evaluation

1. まえがき

Powder-In-Tube (PIT)法で作製した銀シース $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (Bi2223)超電導テープは、液体窒素温度 77K で比較的高い電流容量を持つことから、電力ケーブル⁽¹⁾や変圧器⁽²⁾への応用が期待されており、線材開発が精力的に行われている。

銀シース Bi2223 超電導テープ線材の実用化には、電流容量のさらなる向上が求められる。Bi2223 超電導体はセラミックスであるため、超電導線材に曲げおよび引張り歪、あるいは衝撃等を与えると、線材中の超電導フィラメントにクラック等が生じる。この部分は電流経路を障害する弱結合部分(weak link)となり、その部分での臨界電流(I_c)を低下させる可能性がある。長尺線材のさらなる性能向上、信頼性向上のためには、線材の作製プロセスに関する継続的研究が必要であり、そのためには非破壊で超電導体中の欠陥や弱結合部分を特定し、輸送電流経路を推定できる技術

開発が急務と考えられる。

電力機器に銀シース Bi2223 超電導テープを利用した場合、交流環境で発生する電力損失(交流損失)の低減は重要である。最近では、絶縁性バリア材を導入した銀シース Bi2223 超電導テープ(バリア導入テープ)の試作報告⁽³⁾⁽⁴⁾がなされているが、この種の線材は非常に複雑な断面形状を有するため、製造時に長手方向に沿って同一な断面形状を保持することが困難になると考えられる。銀シース Bi2223 超電導線材の非破壊診断技術の確立は、これらの課題の解決に向けて重要な指針を提供できるものと考えられる。

筆者らは最近、走査型ホール素子法を用いて長さ 2~3cm の銀シース Bi2223 超電導テープの表面残留磁界分布を非破壊で測定し、電磁気学的考察によりテープ長手方向に沿う均質性の評価と輸送電流経路に関する検討を行った⁽⁵⁾⁽⁶⁾。本研究では、この方法を発展させ、1m 級の銀シース Bi2223 超電導テープの表面残留磁界分布を非破壊的に測定する装置を開発し、測定結果を用いて長手方向に沿う超電導特性

の均質性(特に I_c 分布)に関する検討を行った。

2. 実験方法

2.1 銀シース Bi2223 超電導テープの作製

図 1 のような異なる断面形状を有する単芯および多芯の銀シース Bi2223 超電導テープを PIT 法で作製した⁽³⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾。表 1 にそれぞれの諸元を示す。この中で、図 1(c)の 19 芯テープは、各超電導芯を Sr-V-O 絶縁体で包含したバリア導入テープである(図 2 参照)。これらのテープをアルミナ製の円筒型フォーマに巻いて焼結を行い、超電導テープを得た。

(a) mono-filament tape

(b) 19-filament tape

(c) 19-filament tape with barriers

(d) 37-filament tape

(e) 61-filament tape

図 1 銀シース Bi2223 超電導テープの断面写真
Fig. 1. Cross-sectional area of Ag-sheathed Bi2223 tapes.

図 2 Bi2223 超電導芯と Sr-V-O 絶縁体
Fig. 2. Bi2223 filament with Sr-V-O barrier.

表 1 銀シース Bi2223 超電導テープ諸元

Table 1. Geometry of Ag-sheathed Bi2223 tapes.

sample name	width	thickness	length
単芯テープ	3	0.2	1000
19 芯テープ	3	0.3	1000
バリア導入 19 芯テープ	4	0.3	650
37 芯テープ	4	0.3	1000
61 芯テープ	4	0.3	1000

(単位は全て mm)

2.2 走査型ホール素子顕微鏡による磁界測定

図 3 に開発した走査型ホール素子顕微鏡の概略図を示す。本顕微鏡により、残留磁界のもとで最大 1m の超電導テープ表面の磁界分布が測定できる。測定は以下の手順で行う。まず、ベークライト製の試料ホルダに超電導テープを固定し、液体窒素で満たしたデュワー内に挿入する。次に、移動型コイルに 15mT の磁界を発生させ、このコイルを超電導テープ長手方向に沿って移動させ、テープ表面に垂直な磁界を印加した。その後、コイルに流す励磁電流を零にして超電導体を残留磁界状態にした。このとき、試料に 15mT 以上の磁界を印加しても残留磁界は変化せず、試料全体に磁束が侵入し、臨界状態になっている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

ホール素子を超電導テープ表面上で長手方向(X方向)および幅方向(Y方向)に走査させ、得られたホール電圧からテープ表面に垂直な磁界成分を算出し、XY 面上での二次元

図 3 磁界分布測定装置

Fig. 3. Schematic diagram of experimental apparatus.

図4 銀シースBi2223超電導テープの二次元残留磁界分布

Fig. 4. Two-dimensional magnetic-field distribution of Ag-sheathed Bi2223 tapes in a remanent state.

分布を得た。走査間隔はX方向に対して1mm、Y方向に対して0.2mmとした。ホール素子は感磁面積が $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ 、最小感度は $5\mu\text{T}$ 、出力は 68.8mV/T で、磁界測定時の試料表面とホール素子との距離は約0.6mmである。

本顕微鏡は、移動型コイルを用いて超電導テープを残留磁界状態にしているため、ヘルムホルツコイルを用いて均一磁界中で磁化した場合と比べて状態が異なる可能性がある。そこで、長さ数十mmの銀シースBi2223超電導テープを用いて、移動型コイルによる残留磁界分布とヘルムホルツコイルによる残留磁界分布との違いを調査し、両磁化法による磁界分布は定性的に一致することを確認した⁷⁾。

2.3 直流四端子法による I_c 分布の測定

磁界分布を測定した後、超電導テープに電流、電圧端子を半田付けし、長手方向の I_c 分布を直流四端子法を用いて測定した。電流端子はテープの両端部に取り付け、電圧端子は20mmまたは40mm間隔で取り付けた。 I_c はクライテリオン $0.1\mu\text{V/mm}$ で測定した。

3. 結果と考察

図4に単芯テープ、バリア導入19芯テープおよび37芯テープの二次元残留磁界分布を示す。ここで、残留磁界分布のX方向とY方向の縮尺が大きく違うことに注意してほ

図 5 銀シース Bi2223 超電導テープの残留磁界分布(折線グラフ)と I_c 分布(棒線グラフ)

Fig. 5. Magnetic-field distribution in a remanent state (line graph) and I_c distribution (bar graph).

しい。図 4(a)と(c)の縮尺比率 X:Y はいずれも 1:40 であり、図 4(b)は 1:30 である。破線はテープの輪郭を示す。図から、いずれのテープも大きく蛇行しているように見えるが、蛇行幅はテープ幅の 2 倍以内である。このわずかな蛇行は円筒型フォーマを用いた作製工程に起因し、その後の考察に影響を及ぼさない。図中の白→黒の濃淡は磁界の強度を示し、色が濃いほど磁界が強く、淡いほど弱い。また、試料により磁界と白→黒の濃淡の対応が異なる。

図 4(a)の単芯テープの測定結果から、X 方向に沿う磁界分布は、強い残留磁界を示す部分とそうでない部分に別れ、全体として不均一な分布である。同様に、図 4(b)のバリア

導入 19 芯テープの結果も、強い残留磁界を示す部分が局在し、磁界分布は不均一である。一方、図 4(c)の 37 芯テープは、単芯およびバリア導入 19 芯テープと異なり、均一な磁界分布を示す。一般に、残留磁界は超電導体の永久電流によって作られる。超電導テープの長手方向に欠陥や弱結合部分が存在する場合には、その部分で電流経路は分断されて局所的になり、残留磁界分布は長手方向に局在するが、長手方向に電流経路が連続している場合は、超電導体全体に永久電流が流れ、残留磁界は全体にわたって発生すると考えられる⁽⁹⁾⁽⁶⁾。これより、不均一な残留磁界分布は超電導テープの不均一な輸送電流経路を反映していると考えられ

る。図には示さないが、19 芯および 61 芯テープについても長手方向に沿う均一な磁界分布が得られ、輸送電流経路が均一であることを予想させる。

上述のように、単芯テープとバリア導入 19 芯テープは X 方向に不均一な磁界分布を示し、他の多芯テープは均一な分布を示した。残留磁界分布は、超電導体中を流れる輸送電流の経路と密接に関係するため、直流四端子法で求めた X 方向に沿う I_c 分布と残留磁界分布の比較を行った。図 5 に、すべてのテープ試料の X 方向に沿う残留磁界の線分布と I_c 分布との関係を示す。ここで、座標 X に対する残留磁界の大きさは、図 4 の二次元分布において X を固定とした場合のテープ上での磁界の最大値とした。図 5(a)の単芯テープは、X=800~1000mm の間で I_c が約 10A を示すが、全体的に I_c は 3~5A と低い値を示す。また、単芯テープにおいては、必ずしも I_c と残留磁界との間に明確な相関はみられない。一方、図 5(b)の 19 芯テープは、X=480、820mm 付近で残留磁界の低下が認められるが、長手方向全体にわたり比較的高い磁界を示し、単芯テープと比べ残留磁界の不均一さは改善される。この場合には、残留磁界と I_c の間には顕著な相関が認められる。残留磁界と I_c の強い相関は、バリア導入 19 芯テープにも認められるが(図 5(c))、同程度の I_c を示す部分での残留磁界の大きさは、図 5(b)の 19 芯テープと比べて著しく小さい。これは、①各超電導芯が Sr-V-O 絶縁体で包含されているため(図 2 参照)、超電導芯間の結合が遮断されていること、②シース部分が厚く(図 1(c)参照)、ホール素子とのリフトオフが大きいこと、③他の多芯テープと異なり、超電導芯がブロック状に分割されていること、等の原因が考えられる。

図 5(a)、(b)、(d)、(e)を比較すると、バリアを導入していない超電導テープでは、芯数の増加と共に X 方向に沿う残留磁界分布は均一化する傾向を示す。また、芯数の増加と共に X 方向の I_c 分布も均一になり、その絶対値も向上する。これは、芯数の増加による機械的強度の向上⁽⁸⁾⁽⁹⁾、銀界面の増加にともなう Bi2223 結晶の成長促進、等によるものだと考えられる。

今回の実験から、単芯テープ以外の試料において残留磁界と I_c 分布の間に定性的な相関を示す結果が得られたが、37 芯テープと 61 芯テープでは、長手方向に沿う何箇所かで相関の低い部分も認められる。これは線材作製が焼結と機械加工の繰り返しによってなされるためだと考えられる。線引きや圧延等の機械加工時に、超電導テープ内の長手方向に沿うフィラメント配置に変化が生じる場合がある。また、焼結過程の結晶成長により、超電導フィラメント間にブリッジングが生じる。この結果、同程度の I_c を有する部分でも残留磁界に関係する電流経路は長手方向で変化し、 I_c と残留磁界の相関性の低下をもたらす可能性がある。

本研究において、芯数やバリア導入の有無にかかわらず、単芯以外の試料において残留磁界分布と I_c の間に定性的な相関がみられ、磁界が高い部分では I_c も高く、磁界が低い

部分では低くなる傾向を示すことが判明した。残留磁界分布において、磁界が弱い部分には欠陥や弱結合部分が存在すると考えられ、 I_c が低下すると推察される。逆に、残留磁界が強い部分は確たる電流経路が形成されており、相対的にその場所での I_c は高くなると考えられる。今回測定した超電導テープの示す残留磁界分布は、残留磁界が強い場所が局在する場合と、超電導テープ全体に広がる場合とに分類されるが、長手方向に沿う残留磁界分布と I_c 分布の間には定性的な相関が認められた。単芯テープは、残留磁界と I_c に相関がみられなかったが、これは単芯テープの機械的特性が弱い⁽⁹⁾、超電導フィラメントにクラック等が発生し、 I_c の劣化が生じたためだと考えられる。

試料間において、超電導芯数やバリア導入の有無だけでなく、断面形状、幅、厚み等の幾何学的形状も異なるため、試料全体を包含する定量的な相関関係を得るには至らなかった。これらの条件を全て同一にして試料を作製すれば、たとえ異なるテープ間であっても定量的な相関関係が得られるものと予想されるため、この方向で定量的な評価に関する研究を進めている。

4. まとめ

長さ約 1m の銀シース Bi2223 超電導テープの非破壊診断に使用できる走査型ホール素子顕微鏡(感磁面積 $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$)を開発した。本顕微鏡を用いて、単芯、19 芯、37 芯および 61 芯テープ表面における二次元残留磁界分布を測定し、テープ長手方向に沿う臨界電流 I_c の分布と比較した。19 芯テープを除くすべての試料は通常の PIT 法で作製した。19 芯テープの場合には、超電導芯を絶縁体バリアで包含した試料も作製して測定を行い、バリアを導入しない通常のテープの結果と比較した。

単芯テープでは、弱結合や欠陥等の存在により残留磁界分布と I_c 分布は不均一になる。一方、PIT 法で作製した通常の多芯テープでは、芯数の増加につれて、長手方向の磁界分布および I_c 分布はともに均一になるが、バリア導入テープでは、両分布ともに依然として不均一なままである。単芯以外のテープにおいて、芯数やバリア導入の有無にかかわらず、残留磁界分布と I_c 分布の間に定性的な相関が認められ、磁界が強い部分では I_c 値は高く、低い部分では低くなる傾向を示す。

走査型ホール素子顕微鏡は、通常の I_c 測定では得られない超電導体中の弱結合部分や欠陥等の特定、さらには輸送電流経路の推定を可能にする非破壊診断技術として、長尺線材の一層の性能向上や信頼性の確保に向けて少なからざる貢献を果たすものと考えられる。

(平成 13 年 7 月 30 日受付、平成 14 年 1 月 29 日再受付)

文 献

- (1) K. Miyoshi, S. Mukoyama, H. Tsubouchi, A. Takagi, S. Merugo, K. Matuo, S. Honjo, T. Mimura, Y. Tkasaki: 「Design and production of high-Tc superconducting power transmission cable」, *IEEE Trans. Appl.*

Supercond., **11**, 2363-2366 (2001)

(2) K. Funaki, M. Iwakuma: 「Recent activities for applications to HTS transformers in Japan」, *Supercond. Sci. Technol.*, **13**, 60-67 (2000)

(3) P.X. Zhang, R. Inada, T. Uno, Y. Takatori, A. Oota, H. Fujimoto, P. Ji, Z.Z. Daun, C.S. Li, H.L. Zheng, L. Zhou: 「Fabrication and transport AC losses of (Bi,Pb)-2223 multifilamentary tapes with resistive barriers」, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **11**, 2784-2787 (2001)

(4) Y.B. Huang, R. Flükiger: 「Reducing ac losses of Bi(2223) multifilamentary tapes by oxide barriers」, *Physica C*, **294**, 71-82 (1998)

(5) 河野、太田: 「走査型ホール素子を用いた銀シース Bi2223 超伝導単芯テープ表面での磁界測定」, 日本金属学会誌 **61**, 906-912 (1997)

(6) K. Kawano, S. Isoda, A. Oota: 「The study of critical current distribution in Ag-Bi2223 tape using a scanning Hall-Probe magnetometry」, *Physica C*, **282-287**, 2289-2290 (1997)

(7) 坂元、張、太田: 「走査型ホール素子法を用いたメートル級銀シース Bi 系 2223 相超伝導テープの非破壊診断」, 平成 12 年電気学会全国大会 (5-192)

(8) Markku Lahtinen, Jakko Passi, Zhenghe Han, Jyrki Sarkaniemi: 「Microstructure of the ceramic in superconducting Bi-2223 composite tapes after bending strain cycles」, *Physica C*, **277**, 238-242 (1997)

(9) P. Kováč, P.E. Richens, P. Bukva, H. Jones, I. Hušek: 「Applied rolling and sensitivity of Bi(2223)/Ag tapes on I_c degradation by mechanical stress」, *Supercond. Sci. Technol.*, **12**, 168-171 (1999)

太田 昭男

(正員) 1947 年 1 月 1 日生まれ。1970 年 3 月東京大学理学部物理学科卒業。1975 年 3 月名古屋大学大学院理学研究科博士課程修了。以後、名古屋大学工学部電気工学科助手を経て、豊橋技術科学大学電気・電子工学系に勤務。1992 年 4 月より同大学教授。主として、超伝導材料の開発とパワーデバイス応用の研究に従事。理学博士。応用物理学会、日本物理学会、米国物理学会などの会員。

坂元 周作

(学生員) 1976 年 7 月 30 日生まれ。2001 年 3 月豊橋技術科学大学大学院工学研究科修士課程電気・電子工学専攻修了。同年 4 月同大学大学院工学研究科博士後期課程電子・情報工学専攻入学。現在に至る。主として、Bi 系超伝導体の非破壊診断に関する研究に従事。

張 平祥

(非会員) 1965 年 3 月 15 日生まれ。1996 年 3 月東北大学(中国)大学院工学研究科博士課程材料物理学専攻修了。1998 年 3 月から 1999 年 3 月まで東北大学金属材料研究所客員助教授、1999 年 5 月から 2001 年 12 月まで豊橋技術科学大学電気・電子工学系助教授。2002 年 1 月より西北有色金属研究院(中国)副院長。主として、超伝導材料の開発に従事。工学博士。