

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月31日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560308

研究課題名（和文）：超伝導電流トランスと極小精密検出コイルを利用した実用高温超伝導導体の通電特性評価

研究課題名（英文）：Evaluation of Transport Characteristics in HTS Conductors with Large Current Capacity by Using an HTS Current Transformer and Miniature Pick-up Coils

研究代表者：

川畑 秋馬 (KAWABATA SHUMA)

鹿児島大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：00244260

研究成果の概要（和文）：高性能な電力用高温超伝導機器の実用化のためには、大容量で低損失な高温超伝導導体の開発が不可欠であり、さらに開発された実用超伝導導体の定量的な特性評価が必要である。本研究では、実用高温超伝導導体の通電特性を評価するために、種々の条件下で超伝導大型導体の特性評価を行えるコンパクトな測定システムを開発した。本測定システムにより、試料導体の交流損失特性や電流分布特性を首尾よく測定でき、本測定システムが実用高温超伝導導体の特性評価に有用であることを示すことができた。

研究成果の概要（英文）：In order to realize HTS power machines and devices with high performance, the development of HTS conductors with low losses and large current capacities is indispensable, and it is necessary to evaluate the characteristics of HTS conductors quantitatively. In order to evaluate the transport characteristics of HTS conductors with large current capacity, we completed a new compact measurement system for determining the transport characteristics of HTS conductors with large current capacity under various experimental conditions. Our compact system has demonstrated its usefulness for measuring AC loss characteristics and current distribution characteristics of large scale HTS conductors.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：高温超伝導線材、高温超伝導導体、高温超伝導コイル、極小検出コイル、通電特性、電流分布、超伝導電流トランス、Bi-2223

## 1. 研究開始当初の背景

近年、実用高温超伝導線材・導体の開発が精力的に行われており、電力機器への適用に必要な線材特性の高性能化や線材の長尺化が急ピッチで進展している。このような高温超伝導線材を用いた電力ケーブルや限流器、

電力貯蔵装置などの電力用超伝導機器の開発は、電気エネルギーを有効に高効率で利用する上で非常に重要であり、今日のエネルギー事情や地球環境問題を考慮すると早急な実現が要請されている。そのためには、これらの機器に使用される高温超伝導線材・導体の「通電特性（臨界電流特性、通電損失特性、

電流分布特性など)」の詳細な評価が必要である。

通電特性のうち臨界電流特性や通電損失特性は、通常四端子法が用いて評価されるが、高温超伝導機器を実用化するためには、さらに実用高温超伝導線材の電流分布特性を詳細に把握することが重要となってくる。通電特性の中の電流分布特性を評価するにあたっては、非接触での評価が線材開発や製造の観点から有効であるが、未だ十分な評価手法は確立されていない。

一方、高温超伝導線材内の電流分布の測定はロゴスキーコイルやホール素子などを用いた方法によって、国内外の様々な研究機関で行われているが、これらのほとんどが直流通電時の電流分布の測定であり、交流通電時における電流分布の詳細な測定事例は非常に少ない。さらに、超伝導線材を多数本スタックした導体形状の電流分布はこれまでほとんど行われていない。磁気ナイフ法と呼ばれる測定法を用いて、線材内の臨界電流密度を求める研究もあるが、この方法は電力機器用線材の実際の使用環境を模擬した条件下での電流分布測定に対しては不向きであると考えられる。また、レーザを用いて線材の臨界電流密度分布を求める研究もあるが、実際に超伝導機器に使用される数 km～数十 km にわたる長尺線材の評価は困難である。

このように、電力用高温超伝導機器の実用化のためには、これらの機器に使用される高温超伝導線材・導体の通電特性の定量的な評価が重要であるが、その特性評価法は十分に確立していないため、新しい特性評価システムの開発が必要とされているのが現状である。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、電力用高温超伝導機器の実用化に資するために、種々の条件下で高温超伝導大型導体の通電特性を定量的に評価できるコンパクトな新しい測定システムを開発するとともに、高温超伝導大型導体の通電特性を明らかにすることである。

本研究では、これまで申請者が開発した超伝導線材の電流分布測定法をさらに高感度化並びに高精度化することにより非接触でのそれらの評価手法の確立を目指す。実用高温超伝導導体の電流分布特性の評価だけでなく、電流分布特性と通電損失特性を同時に測定し、両者の関連性についても検討する。さらに、得られた結果から線材やコイルの特性劣化や異常状態の検出、ならびにそれらの保護の方策についても有用な知見を見出すことも試みる。

## 3. 研究の方法

本研究では、これまで申請者が開発した電

流分布測定法のさらなる高感度化並びに高精度化を図り、これを実用高温超伝導短尺線材・導体およびコイル形状にした長尺線材に適用する。さらに、必要となる 1kA 級の大電流通電には、最近開発した高温超伝導電流トランスを活用することで、コンパクトな測定システムの開発を図る。以上のことにより、実用高温超伝導導体の通電特性を非接触で定量的に評価できる手法の確立およびその評価が可能となる。

電流分布の測定に関しては、極小サイズの検出コイルを用いて、高温超伝導線材やコイル周辺の磁界分布の詳細測定を行い、その結果から数値計算により間接的に電流分布を求める。本研究では、精密極小検出コイルの作製や測定対象である線材・導体やコイル周辺の磁界分布計測を精確に行える検出コイル移動システムの構築を行い、非接触通電特性評価法の確立を図る。

また、測定試料への 1kA 級の交流電流の通電に関しては、通常大型の電源システムを必要とするため、電源のコストや設置スペースなどの問題が生じる上に、通電時の電源リップルが微小電圧測定に影響を及ぼすが、本研究では超伝導電流トランスの活用により、これらの問題を一気に解決できる。

さらに本研究では、電流分布と通電損失を同時に測定し、両者の関連性についての検討も行うが、そのための通電損失測定にはポインティングベクトル法を用いて行う。

本研究では、これまでの研究で得られた成果を基に、具体的には、以下の要領で研究を進める。

- (1) 既存の磁界分布測定システムの高感度化
  - ① 測定には精密極小検出コイルを用いるが、高感度化のためには測定の空間分解能を上げる必要がある。そのために検出コイルは、これまで以上にコイルサイズを小型化したものを製作する。検出コイルには線材は直径 40  $\mu\text{m}$  の極細銅線を使用する。
  - ② 信号電圧の測定にはロックインアンプを使用し、電圧の測定感度を上げる。
  - ③ 既存のデータ収集方式は、絶縁アンプで増幅した測定信号を A/D 変換ボードを介してコンピュータに取り込む方式であるが、これをロックインアンプを使用した方式に変更するため、測定システムのハード面及びソフト面の両者についても変更・改良する。
- (2) 既存の磁界分布測定システムの高精度化
  - ① これまでの測定では、磁界分布を測定するために、検出コイルの移動に移動精度 0.1mm の X-Y ステージと移動精度 0.01mm のデジタルノギスを組合せて測定しており、かつその測定は手動で行っていたが、検出コイルの移動部分に、高精度自動 X-Y

ステージとステージコントローラを導入することで、磁界分布の精密測定を自動で行える検出コイル移動システムを構築し、測定の高精度化と高効率化を図る。

- ② さらに、数本テープ線材をスタックした導体形状、あるいはコイル形状の磁界分布を測定するために、実験装置の改造を行う。また、これに対応した検出コイル移動システムの改造も同時に行う。

### (3) 測定対象および測定項目

- ① 測定する高温超伝導テープ線材は、入手が容易な Bi-2223 線材を用いる。測定は、まず直線状の短尺線材 1 本に対して、通電特性の測定を行う。さらに、特性劣化や異常状態を模擬した実験も行い、線材の特性劣化や異常状態と測定磁界分布特性の関係についても調べる。
- ② 銅線束及び銅テープを用いて、測定装置の校正及び性能試験を行う。その後、各種線材に対し、磁界分布の通電電流振幅依存性、周波数依存性を測定する。測定箇所は、線材断面の幅方向及び厚み方向のほか、線材長手方向についても行う。テープ線材の断面形状の観察を行い、測定結果と超伝導フィラメント束及び常伝導外皮層の状態との関係についても調べる。
- ③ 得られた測定結果から、短尺線材の通電特性の評価法として十分な精度を有するかを検討する。また、特性劣化や異常状態における電流分布の特徴についても纏める。
- ④ 短尺線材 1 本の測定に引き続き、高温超伝導テープ線材を 2～数本スタックした導体形状の磁界分布の測定を行う。短尺テープ線材に対して行った測定項目を、導体形状の場合についても同様に行う。導体への通電は高温超伝導電流トランスを用いて行うが、電流分布特性と同時に通電損失特性も測定する。
- ⑤ さらに高温超伝導テープ線材により単層ソレノイドコイルを巻線し、コイル形状の測定を行う。テープ線材・導体に対して行った測定項目を、コイル形状の場合についても同様に行い、測定結果について検討する。

### (4) 電流分布算出プログラムの改良並びに測定結果の検討

- ① 得られた実験結果に対し、現有の数値計算プログラムを行い、種々の測定条件下における電流分布の算出を行う。
- ② さらに、得られた結果について検討し、より精度の高い電流分布の計算結果が得られるように、現有の電流分布算出プログラムのアルゴリズムの改良を行う。

### (5) まとめ

- ① 得られた測定結果から、短尺線材、導体

形状、コイル形状に対する本非接触評価手法の有効性について検討する。また、電流分布特性と通電損失特性の関連性についても検討する。

- ② さらに、測定試料の特性劣化や異常状態に対する本非接触診断法の有効性について検討する。また、得られた結果から線材やコイル保護の方策についても有用な知見の抽出を試みる。

## 4. 研究成果

本研究では、高温超伝導機器の実用化のために開発が行われている高温超伝導線材・導体(実用高温超伝導線材・導体)を対象とし、それらの通電特性を定量的に測定できる新しい測定システムを開発すると共に、それらの特性を評価することを目的とした。研究成果をまとめると以下のとおりである。

(1) 平成 21 年度は、所有する既存の磁界分布測定システムの高感度化・高精度化を行った。その結果、以下の知見を得た。

- ① 本研究では測定には精密極小検出コイルを用いるが、高感度化のために、検出コイルの巻線に直径  $40\mu\text{m}$  の極細銅線を使用し、コイルの小型・高精密化を図ることで、測定空間の分解能を向上させることができた。
- ② また、測定システムの高精度化のために、既存システムにおける検出コイルの移動部分を、自動 X-Y ステージとステージコントローラの導入により自動化し、測定の高精度化と高効率化が図れた。
- ③ さらに、実際にこの測定システムを用いて、短尺直線形状の Bi-2223 高温超伝導テープ線材の電流分布測定を行い、首尾良くデータ収集が行えることを確認できた。
- ④ また、既存システムを用いて別途、Bi-2223 を 2 枚積層した導体の電流分布特性を測定し、積層した場合の遮蔽電流の影響の程度についての知見が得られた。

(2) 平成 22 年度は、通電用電源として 1kA 級の高温超伝導電流トランスを活用し、試料導体の通電特性評価が行えるように電流トランスと試料導体との接続方法について検討した。その結果、以下の知見を得た。

- ① 半田接続の代わりに、ベーク板で試料導体を挟みネジ留めする圧力による接続方法の採用することにより、様々な用途の超伝導導体を対象とした特性評価を行う上で接続部に要求される、(i)特性評価が十分行えるだけの低抵抗の接続抵抗であること、(ii)繰り返し導体を接続できること、(iii)簡便な接続方法であること、などの要件を満たす接続方法を実現できた。
- ② さらに、この超伝導電流トランスに Bi-2223 超伝導テープ線材 16 本からなる並

列導体を実際に接続し、その電流分布や通電損失測定を行い、試料導体の通電特性を首尾よく評価できた。

- ③ また、接続長さを変化させたときの試料導体の通電電流値と接続抵抗との関連性についても明らかにした。
- ④ 一方、極小精密検出コイルによる短尺試料やコイル形状試料の局所異常箇所の検出方法についても検討した結果、検出コイルの測定電圧から超伝導試料の磁化信号電圧のみを抽出することにより、コイル端子電圧では検出が困難な局所異常状態も検出可能であることがわかった。これより、極小精密検出コイルを線材やコイルに配置することにより、線材やコイルの異常検出や保護にも有効であることがわかった。

(3) 平成 23 年度は、1kA 級の高温超伝導電流トランスを活用し、大電流容量高温超伝導導体の通電特性を定量的に評価した。試料線材としては Bi-2223 テープ線材を用い、これを 5 枚積層したものを 2 本作製し往復導体にして高温超伝導電流トランス接続した (図 1)。この電流トランスと往復試料導体で形成される閉回路に対し、交流通電時における試料導体の電流分布特性とインダクタンスや接続部の抵抗などの回路パラメータとの関係について詳細に調べた。その結果、以下の知見を得た。

- ① 電流トランスの電流比を測定した結果、通電電流の増加に伴い閉回路のインダクタンスが増加することがわかった。
- ② また、電流分布特性の測定結果より、通電電流の増加に伴い、試料導体断面内の電流分布が導体両端部から導体中央部に多く流れる領域が変化していく様子が観測できた。
- ③ さらに、この通電電流の増加に伴うインダクタンスの増加は、導体断面内の電流分布特性の変化により説明できることを数値計算により示すことができた。なお、通電電流の増加に伴う接続抵抗の変化は観測されなかった。

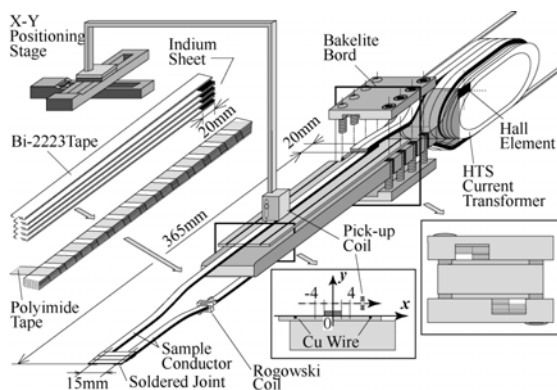


図 1 超伝導導体と超伝導電流トランスの接続図

- ④ 一方、ポインティングベクトル法を用いた導体の通電損失特性も首尾よく測定でき、高温超伝導導体の電流分布特性と通電損失特性を同時に測定できる測定システムを完成させることができた。

以上のように、本研究では、高温超伝導大型導体の通電特性を評価するために、種々の条件下で高温超伝導大型導体の特性評価を行えるコンパクトな測定システムを開発した。本測定システムにより、試料導体の交流損失特性や電流分布特性を首尾よく測定でき、本測定システムが高温超伝導導体の特性評価に有用であることを示すことができた。

超伝導大型導体の電流分布特性と交流損失特性の両者を同時に評価できる測定システムは国内外において希少であり、今後、本システムを活用して得られる測定結果は、電力用高温超伝導機器に用いる実用導体の開発において有用な知見となるものと考えられる。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① Shuma Kawabata, Katsuya Nonaka, Kohdai Tokushige, Tadashi Hirayama, “Measurement of Transport Characteristics in HTS Conductors with Large Current Capacity by Using an HTS Current Transformer,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 査読有, Vol. 22, 2012, to be published.
- ② Shuma Kawabata, Tadashi Hirayama, Kazutomo Maehara, Yuhki Kirihara, “Development of a Compact Measurement System of Transport characteristics in HTS Conductors by Using an HTS Current Transformer,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 査読有, Vol.21, No.3, 2011, pp.3377-3380, DOI:10.1109/TASC.2010.2092323
- ③ Shuma Kawabata, Kazuya Miyahara, “Indirect measurement of AC current distributions in HTS tapes by a pickup coil method,” *Physica C*, 査読有, Vol.470, 2010, pp.1325-1328, DOI:10.1016/j.physc.2010.05.104

[学会発表] (計 5 件)

- ① 徳重昂大ほか, “高温超伝導電流トランスによる高温超伝導導体の通電特性”, 2011 年度秋季低温工学・超電導学会, 平成 23 年 11 月 9 日, 金沢歌劇場
- ② Shuma Kawabata, “Measurement of Transport Characteristics in HTS Conductors with Large Current Capacity by Using an HTS Current Transformer,” The 22nd International Conference on Magnet Technology (MT-22), 平成 23 年 9 月 15 日, マルセイユ
- ③ 前原一智ほか, “高温超伝導電流トランス

を用いた高温超伝導大型導体の通電特性測定”, 2010 年度秋季低温工学・超電導学会, 平成 22 年 12 月 1 日, かがしま県民交流センター

- ④ Shuma Kawabata, “Development of a Compact Measurement System of Transport characteristics in HTS Conductors by Using an HTS Current Transformer,” The Applied Superconductivity Conference 2012 (ASC2010), 平成 22 年 8 月 3 日, ワシントン D. C.

- ⑤ Shuma Kawabata, “Indirect measurement of AC current distributions in HTS tapes by a pickup coil method,” 第 22 回国際超電導シンポジウム, 平成 21 年 11 月 3 日, つくば国際会議場

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川畑 秋馬 (KAWABATA SHUMA)  
鹿児島大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号：00244260