

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 3月31日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23760263

 研究課題名（和文） 次世代高温超伝導線材の電力応用への基盤技術となる
高速・高分解能・非破壊評価技術

 研究課題名（英文） High-speed, High-resolution and Non-destructive Characterization
Technique for Next-generation HTS Wire as a Fundamental Technology
for Its Application to Electric Power Devices

研究代表者

東川 甲平（HIGASHIKAWA KOHEI）

九州大学・大学院システム情報科学研究院・准教授

研究者番号：40599651

研究成果の概要（和文）：

本研究の目的は、次世代高温超伝導線材の電力機器応用へのキーテクノロジーとなる高速・高分解能・非破壊の標準的評価システムの開発である。電流容量と交流損失の観点から極めて高いポテンシャルを有する本線材に残された課題は、超伝導特性の均一性を工業生産レベルの長さにわたって確保することであり、非破壊かつ高分解能の評価手法の開発が急務となっていた。そこで本研究では、申請者等が短い線材を用いて既に原理検証を終えていた磁気顕微鏡をさらに発展させ、特に評価速度を200倍に向上させることに成功し、長尺線材の局所臨界電流密度分布を製造速度と同等の評価速度で連続的かつ非破壊にイメージングすることが可能となる評価技術を開発した。

研究成果の概要（英文）：

High-speed, high-resolution and non-destructive characterization technique for 2nd-generation high-temperature superconducting (2G HTS) wire has been successfully developed in this program. Improving the characterization speed to 200 times faster, the technique has finally visualized in-plane distribution of local critical current density for a 2G HTS wire at a characterization speed equivalent of its manufacturing speed with the spatial resolution of 1 mm. This technique will be a very powerful tool for overcoming the problem of spatial inhomogeneity in 2G HTS wires intended to electric power applications.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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、臨界電流密度分布、局所不均一性、非破壊評価、磁気顕微鏡

1. 研究開始当初の背景

イットリウム系の高温度超伝導材料からなる次世代高温超伝導線材は、実績の豊富な低温超伝導線材に比較して、1) 冷却負荷低減、という大きなメリットを有することはもちろん、第1世代高温超伝導線材に比較しても、2) 特性当たりの飛躍的なコスト低減、3) 高機械強度、4) 低交流損失、を同時に達成するまさにブレークスルーとなる超伝導線材である。我が国では、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の支援によって、長さ数百メートル以上にも及ぶ線材の開発に成功している。また、米国では我が国より電流容量は劣るものの1 km以上の長さの線材の開発にも成功している。本線材が電力機器に適用されれば、冷却機構まで含めても環境負荷の低減や高エネルギー密度化による省スペース化が期待され、従来技術によって既に高いレベルに達している電力機器に更なる付加価値が与えられる。

一方、本線材はテープ形状の金属基板上に上記の長さのスケールで超伝導薄膜を形成するという極めて高度な技術を要する構成となっており、現在では1 km級の線材の作製が可能になっているとはいえ、超伝導特性の局所均一性に課題を抱えている。線材中の局所欠陥は通電時の局所発熱につながり、最悪の場合には部分的な焼損に発展する。また、交流損失低減に極めて有効となる細線加工やマルチフィラメント加工を視野に入れた場合、微小欠陥がいずれかのフィラメントに当たり、そのフィラメントが使い物にならない状況も懸念される。従って、次世代高温超伝導線材の電力機器応用には、テープ形状の線材の面内均一性を確保すること、端的に言えば、長さ1 kmの線材に対して1 mm以下の空間分解能で局所特性を評価できる技術が要求される。

以下に先行研究について記述する。工業生産レベルの長尺線材に対する特性評価手法としては、まず、1) 四端子法による通電試験が挙げられる。この手法は実際に線材に通電して発生電圧を計測する手法であるため、定量性は確保されるが、計測機構のサイズの小小型化には致命的な限界があり（10 mm程度）、解像度の点で問題がある。また、線材を焼損させる危険性もあり、非破壊という要件を必ずしも満足できるとは限らない。一方、非破壊であり半定量的な評価手法としては、2) 固定式多チャンネルホール素子法（TAPESTARTM）が挙げられる。ただし本手法は、線材長手方向の均一性に対する評価技術としては確立されているものの、幅方向に関しては全く関知しないという問題がある。次世代高温超伝導線材に関しては、細線化やマルチフィラメント化による交流損失の低減

など、加工によって得られる付加価値が大きいため、幅方向に関しても高い解像度で情報を得ることは必須となっている。また、幅の異なる線材には適用できないなど、標準化を指向した評価技術としては力不足な点が目立つ。線材長手方向と幅方向の2次元面での均一性の評価が可能な手法としては、3) 磁気光学イメージング（MOI）が挙げられる。ただし、この手法の決定的な課題は、均一性は評価できても、流れる電流の大きさを定量的に評価できないことである。以上は、国外まで含めた研究状況であり、線材長手方向と幅方向の2次元面での均一性の評価が可能であり、十分な解像度（例えばフィラメント幅として想定される1 mm）で定量評価の可能な、標準評価手法として耐え得る評価技術は存在しなかった。

一方、我々はこれまでに、外部磁界印加型走査型ホール素子顕微鏡を開発し、線材長手方向と幅方向の2次元面内における局所特性（具体的には局所的臨界電流密度）を高分解能かつ非破壊で可視化することに成功している。その原理は以下のとおりである。まず、超伝導線材では外部磁界が印加された際に、その磁界の侵入を防ぐような遮蔽電流が誘起される。その際の線材周辺の磁界分布を走査型ホール素子顕微鏡によって測定すれば、逆問題を解くことで線材内の遮蔽電流分布が得られる。この遮蔽電流は、線材が超伝導状態を保てる目いっぱい大きさで流れるため、結果的に臨界電流密度分布として得られるという原理である。例えば、長さ70 mm、幅10 mmの短尺試料に対して、解像度200ミクロンで局所的臨界電流密度分布を得ることができている。このように短尺の線材に対しては既に原理検証を終えており、本手法を長尺の線材の評価に適用することが可能となれば、既述の課題を解決する次世代高温超伝導線材の標準的評価手法になり得る。

2. 研究の目的

そこで本研究では、上記磁気顕微鏡をさらに発展させ、長尺の次世代高温超伝導線材の局所臨界電流密度分布を非破壊で評価できるシステムを構築することを目的とする。具体的には以下の項目に取り組む。

(1) 評価速度の飛躍的な向上

解像度を1 mmとした場合の評価速度を、現状の0.18 m/hから少なくとも本線材の製造速度と同等の数十 m/hに向上させること、すなわち100倍以上の高速化を目指す。

(2) 測定可能な線材長の飛躍的な向上

長尺線材の搬送機構を導入し、測定可能な線材長を現状の 70 mm から 100 m とすることを旨す。

3. 本研究の方法

(1) 評価速度の飛躍的な向上

評価速度の飛躍的な向上に向けて、以下の項目に取り組んだ。

- ① ホールセンサの走査速度の大幅向上
- ② それに伴って大きくなるノイズの除去
- ③ 測定データのリアルタイム保存のためのデータ量低減

まず、項目①を実現するため、ホールプローブの走査機構に高速・高推力リニアサーボモータステージを導入した。なお本ステージは、線材幅方向を 1 秒間に 10 回以上も往復することが可能な仕様となっている。この状態で、図 1 に示すように、ステージあるいは線材を長手方向に搬送することができれば、線材面内に対して磁界分布を取得することが可能となり、最終的にはそれに対応した臨界電流密度分布が得られる。

また、項目②③を実現するため、磁界分布の計測には、交流バイアスしたホール素子の出力電圧を、ロックインアンプを通じて最低限のサンプリング周波数で取得するという方式を採用した。図 2 にその効果を示す。直流バイアスされたホール素子の信号をそのままサンプリングした場合には、同図左上に示すように、かなりの雑音を含んだ信号となる。従来は、その信号に対して 1000 個のデータを使用して移動平均を行うことにより雑音を低減し、同図右上に示すような信号を得ていた。すなわち、有効なデータ量の 1000 倍のデータ量を扱う必要があった。一方、本研究のように評価速度の飛躍的な向上を想定した場合には、信号のサンプリングとそのデータの処理・保存が間に合わなくなる恐れがある。参考のため、雑音の低減を諦めて有効なデータ量だけサンプリングした結果を同図左下に示す。磁界分布から臨界電流密度分布の変換に耐え得る信号とは言い難い。そこで、ホール素子のバイアスを交流に変更し、ロックインアンプを使用することで、雑音の低減に取り組んだ。その結果を、同図右下に示す。必要なデータ量だけサンプリングしたにも関わらず、従来評価と同等の品質の信号を取得できていることがわかる。すなわち、扱うデータ量を 1/1000 に低減することができ、単位時間あたりに処理可能なデータ量が同じ場合には、少なくとも 1000 倍程度の評価速度までは雑音とデータ処理が評価速度の律速にならないことを意味している。

幅方向の高速往復動作 & 長手方向への移動 (高速・高推力リニアサーボモータステージを適用)

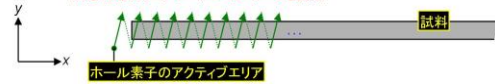


図 1 線材幅方向へのホールセンサの高速走査と長手方向への移動による磁界分布の高速計測

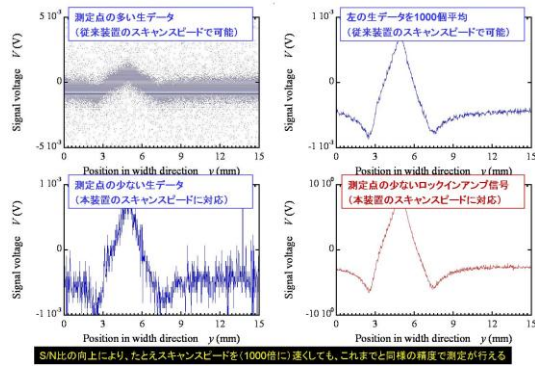


図 2 高速走査時の雑音とロックインアンプの使用によるその低減効果

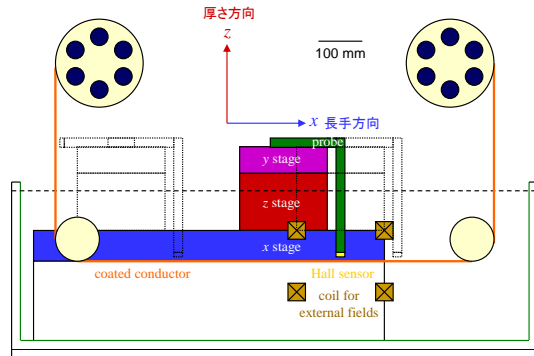


図 3 長尺線材対応のためのリール式線材搬送機構の導入

(2) 測定可能な線材長の飛躍的な向上

従来では、測定対象である線材を固定し、ステージを移動させることで磁界分布の計測を行っていたが、この場合には試料室のスペースの制約から測定可能な線材長が 70 mm と制限されていた。そこで本研究では、実用長レベルの長尺線材の評価を可能とすべく、線材を長手方向に移動させるための線材搬送機構を導入した。図 3 にその概略図を示す。リールの回転によって、線材は長手方向に移動し、液体窒素中で磁化される。線材の移動速度をモニタし、リールを回転させているステッピングモータの回転数を制御すること

によって、線材を一定速度で移動させる。その状態で、前述の高速・高推力リニアサーボモータステージ（図中の y ステージ）によってホールセンサを線材幅方向に高速走査することにより、磁化された長尺線材の磁界分布を連続的に取得することが可能となる。

4. 研究成果

以上の手法により長尺線材を評価した例を図4に示す。テープ形状の線材の面に対して垂直な成分の磁界 (B_z) 分布を長尺線材に対して取得できている。この磁界分布に対して、Biot-Savart 則の逆問題を解くことにより、線材内のシート電流密度 (J) 分布を評価した。電流は線材の下半分で右側に、上半分で左側に流れており、この反時計回りの永久電流によって線材が磁化されていることがわかる。この電流密度の大きさは、超伝導状態を保つことができる上限で流れるため、臨界電流密度に対応することになる。例えば、本線材に関しては、線材の幅方向の端部で周期的に信号強度が低下している様子が示されており、このような情報は本研究成果によって初めて明らかとなったものである。また、この電流密度分布を、それぞれの線材長手方向位置において幅方向に積分することにより、線材の電流容量に対応する臨界電流 (I_c) を評価することが可能となる。通常は、四端子法による測定によって評価される臨界電流値を、非破壊かつ長手方向の分布まで含めて評価できるようになった。なお、本測定と四端子法の空間分解能と電界基準を揃えた場合には、臨界電流値が定量的に一致することも確認済である。さらに、本測定の特長としては線材幅方向の分布が得られる点が挙げられ、例えば超伝導特性を有する実効的な幅を表現する有効線幅 (w_e) という指標を提案した。本線材の幾何学的な幅は 5.0 mm であるが、有効線幅は 4.5 mm 幅付近で分布しており、これは線材の幅方向端部の超伝導特性が低いことを端的に示すものである。このような線材幅方向端部の特性低下は、特に電力ケーブルにおける交流損失増大の原因として報告されており、本測定によって品質管理を行うことが電力応用の観点から極めて重要となることがわかった。

以上のように、線材開発へのフィードバックと品質管理に資する情報を連続的かつ長尺にわたって 評価可能なシステムを構築することに成功した。最終的には以下を達成した。

- ・評価速度：36 m/h
(従来の 200 倍、線材の製造速度と同等)
- ・線材長：200 m
(目標の 100 m を達成)

- ・線材幅方向の解像度：0.5 mm
(目標の 1 mm を達成)
- ・線材長手方向の解像度：1.0 mm
(目標の 1 mm を達成)

すなわち、長さ 100 m 以上の線材中の 1 mm のサイズの欠陥をピンポイントで検出することが可能となり、本線材の均一性向上に大きく貢献するものと期待できる。本成果は、特に当該分野で高く評価され、国際会議における招待講演の依頼や学会賞を頂いた。また、本評価技術は一部の超伝導線材メーカーにも導入されたところである。今後の展開としては、本線材の大量生産に対応するため、また交流損失の問題を解決する細線加工線材・マルチフィラメント線材の評価のため、さらなる評価速度の高速化と解像度の向上に取り組んでいきたいと考えている。

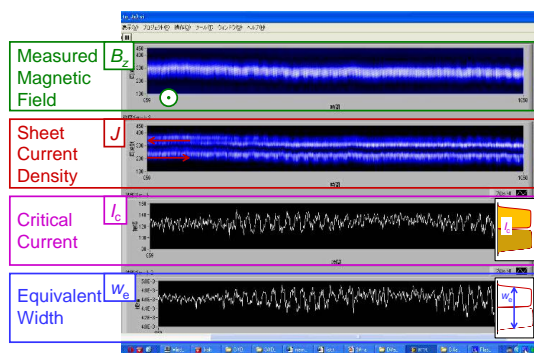


図4 長尺次世代高温超伝導線材の評価例：上から、測定磁界 (B_z) 分布、局所臨界電流密度に対応するシート電流密度 (J) の面内分布、局所臨界電流 (I_c) の長手方向分布、有効線幅 (w_e) の長手方向分布

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- (1) K. Higashikawa, K. Katahira, K. Okumura, K. Shiohara, M. Inoue, T. Kiss, Y. Shingai, M. Konishi, K. Ohmatsu, M. Yoshizumi, T. Izumi, H. Okamoto, “Lateral Distribution of Critical Current Density in Coated Conductors Slit by Different Cutting Methods”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 23, no. 3 (2013) pp. 6602704_1-4. (DOI: 10.1109/TASC.2013.2238983)
- (2) K. Higashikawa, K. Shiohara, M. Inoue, T. Kiss, M. Yoshizumi, T. Izumi,

“Estimation of Local Current Transport Properties in Thin Film Superconductor Based on Scanning Hall-probe Microscopy”, MRS Proceedings, vol. 1434 (2012) mrs12-1434-i03-04.

(DOI: 10.1557/opl.2012.1587)

(3) K. Higashikawa, K. Shiohara, Y. Komaki, K. Okumura, K. Imamura, M. Inoue, T. Kiss, Y. Iijima, T. Saitoh, T. Machi, M. Yoshizumi, T. Izumi, H. Okamoto, “High-speed scanning Hall-probe microscopy for two-dimensional characterization of local critical current density in long-length coated conductor”, Physics Procedia, vol. 27 (2012) pp. 228-231.

(DOI: 10.1016/j.phpro.2012.03.452)

(4) K. Higashikawa, K. Shiohara, M. Inoue, T. Kiss, T. Machi, N. Chikumoto, S. Lee, K. Tanabe, T. Izumi, H. Okamoto, “Noncontact Characterization of In-Plane Distribution of Critical Current Density in Multifilamentary Coated Conductor”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 22, no. 3 (2012) pp. 9500704_1-4.

(DOI: 10.1109/TASC.2011.2176711)

[学会発表] (計 14 件)

(1) (Invited) K. Higashikawa et al., “Nondestructive reel-to-reel characterization system for in-plane 2D distribution of critical current density in long coated conductors (invited)”, 25th International Symposium on Superconductivity (ISS2012), Edogawa-ku, Japan (December 3-5, 2012).

(2) (Invited) K. Higashikawa et al., “Reel-to-reel scanning Hall-probe microscopy for in-plane distribution of critical current density in long coated conductors”, 2012 Applied Superconductivity Conference (ASC2012), Portland, Oregon, USA (October 7-12, 2012).

(3) K. Higashikawa et al., “Lateral distribution of critical current density in coated conductors slit by different cutting methods”, 2012 Applied Superconductivity Conference (ASC2012), Portland, Oregon, USA (October 7-12, 2012).

(4) K. Higashikawa et al., “Nondestructive RTR characterization of long GdBCO coated conductor”, The 2nd Korea Japan Superconducting Technologies for Electric Power System, Chagwon National University, Changwon, Korea (August 9, 2012)

(5) K. Higashikawa et al., “Estimation of Local Current Transport Properties in Thin Film Superconductor Based on Scanning Hall-probe Microscopy”, 2012 MRS Spring Meeting & Exhibit, San Francisco, California, USA (April 9-13, 2012).

(6) K. Higashikawa et al., “High-speed scanning Hall-probe microscopy for two-dimensional characterization of local critical current density in long-length coated conductor”, 24th International Symposium on Superconductivity (ISS2011), Edogawa-ku, Japan (October 24-26, 2011).

(7) K. Higashikawa et al., “Noncontact Characterization of In-plane Distribution of Critical Current Density in Multifilamentary Coated Conductor”, 22th International Conference on Magnet Technology (MT-22), Marseille, France (September 11-16, 2011).

(8) (招待講演) 東川甲平 他, “臨界電流特性評価(2): 磁気的手法”, 低温工学・超電導学会九州・西日本支部 2012 年度若手セミナー・支部研究成果発表会 (2012 年 9 月 17-19 日).

(9) (招待講演) 東川甲平 他, “高温超伝導マグネット応用に向けた線材特性評価・電磁特性解析・コイル設計技術”, 日本磁気科学会磁場発生分科会/東北大学金属材料研究所強磁場センター 合同研究会, 東北大学金属材料研究所, 仙台市 (2011 年 10 月 27-28 日).

(10) 東川甲平 他, “RE-123 線材における局所 I_c の長手方向分布の評価とその空間スケール依存性に関する考察”, 平成 24 年電気学会全国大会, 名古屋大学, 名古屋市 (2013 年 3 月 20-22 日).

(11) 東川甲平 他, “長尺コート線材における臨界電流の幅方向分布の連続非接触計測”, 2012 年度秋季低温工学・超電導学会, いわて県民情報交流センター (アイーナ), 盛岡市 (2012 年 11 月 7-9 日).

(12) 東川甲平 他, “PLD-GdBCO 線材への BaHfO₃ 人工ピン導入がマグネット応用に与える効果についての検討”, 平成 24 年電気学会全国大会, 広島工業大学, 広島市 (2012 年 3 月 21-23 日).

(13) 東川甲平 他, “長尺 RE-123 線材の面内臨界電流密度分布非破壊評価に向けたリール式磁気顕微鏡システムの開発”, 2011 年度秋季低温工学・超電導学会, 金沢歌劇座, 金沢市 (2011 年 11 月 9-11 日).

(14) 東川甲平 他, “長尺 RE-123 線材の面内臨界電流密度分布の非破壊評価に向けた走査型ホール素子顕微鏡システムの高速化”, 2011 年度春季低温工学・超電導学会, 物質・材料研究機構 (千現地区), つくば市 (2011 年 5 月 18-20 日).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

[その他]

受賞 :

東川甲平, 平成 25 年度低温工学・超電導学会奨励賞

6. 研究組織

(1) 研究代表者

東川 甲平 (HIGASHIKAWA KOHEI)

九州大学・大学院システム情報科学研究所
・准教授

研究者番号 : 4 0 5 9 9 6 5 1

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :