

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360122

研究課題名(和文) リール式高速磁気顕微鏡による長尺高温超伝導線材の局所不均一性の解明と高性能化

研究課題名(英文) Reel-to-reel fast scanning magnetic microscopy of long length HTS tapes to resolve local inhomogeneity of critical currents

研究代表者

木須 隆暢 (KISS, Takanobu)

九州大学・システム情報科学研究科(研究院・教授)

研究者番号：00221911

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,500,000円

研究成果の概要(和文)：高温超伝導テープ線材の面内臨界電流(I_c)分布を長尺に亘って高速にかつ非破壊に評価可能な手法を開発すると共に、微細組織観察と複合化したハイブリッド顕微鏡を提案し、その有用性を示した。すなわち、200 m級商用長尺線材や細線加工線材に適用して電流制限因子を解明し、作製プロセスへと効果的にフィードバックすることで高性能化を実現した。さらに、線材 I_c の統計揺らぎに関する解析をもとに通電特性に関する物理モデルを確立した。

研究成果の概要(英文)：We have developed a non-destructive and fast characterization method of spatially resolved critical current (I_c) distribution in superconducting tapes and wires based on the scanning Hall-probe microscopy. It has been demonstrated that this method is very powerful (1) to find a bottleneck which limits global performance of an industrial scale long length tapes in hundreds of meters, (2) to investigate the origin of local inhomogeneity based on a hybrid microscopy correlating local I_c variation and microstructural disorder in multi-scale analysis covering 7 decades of length scale from hundreds of meters down to tens of micro-meters, (3) to establish the processes for narrow and/or multifilamentary HTS conductors for the reduction of magnetization in magnet applications and of AC losses in power applications. We have also established a physical model to describe in-field current transport properties in HTS tapes based on the statistical analysis of I_c variation in long length tapes.

研究分野：超伝導工学、計測工学

キーワード：高温超伝導線材 臨界電流 均一性 欠陥検出 マルチスケール 磁気顕微鏡 ハイブリッド顕微鏡
非破壊・非接触

1. 研究開始当初の背景

酸化物高温超伝導体は、高い臨界温度に加え、従来の金属系超伝導材料を遙かに凌駕する高磁界特性を有することから、その線材化研究が精力的に行われている。超伝導線材の実用性能を決定づける最も重要な材料パラメータは、電気抵抗ゼロで輸送できる電流の最大値（臨界電流: I_c ）であり、 I_c 値の向上と均一性の実現が、重要な開発課題となる。超伝導線材の I_c 値は、一般に四端子法や磁化法によって評価される。しかしながら、いずれの手法も直接の観測量は試料サイズに亘るマクロな物理量であり、 I_c の値は試料の均一性を前提として導出されている。

一方、高温超伝導線材は短いコヒーレンス長や複雑な結晶構造に起因して、局所的な不均一性の影響を顕著に受ける。空間的な揺らぎは線材の電界-電流密度 ($E-J$) 特性に反映され、 I_c の統計的広がり幅や頻度は $E-J$ 特性の転移の急峻さや、直流応用で本質的となる低電界領域での特性に現れるが、高温超伝導線材におけるこれらの挙動は明らかにされていないばかりか、その為の測定法すら十分に確立できていない。

また、高温超伝導線材は超伝導組織の配向を必要とするため、積層プロセスや圧延加工によって形成され、テープ状の形態を有する。変動磁場下の線材に誘起される磁化に伴う交流損失を低減するためには、細線加工やファイラメント加工が必要となる。

2. 研究の目的

本研究は、磁気顕微鏡法を基に、高温超伝導テープ線材の面内臨界電流分布を長尺に亘って高速にかつ非破壊に評価可能な手法を確立すると共に、実用レベルの長尺線材の局所的不均一性の統計性を明らかにすることによって、作製プロセスへとフィードバックし、高性能線材を実現しようとするものである。従来法では検出不可能な数 $10 \mu\text{m}$ オーダーの空間分解能を有し、かつ数 100 m 級長尺線の評価を実現し、7桁に亘るマルチスケール解析の結果を基に、実用性能の制限因子を明らかとし、高性能化を実現する。得られた統計事象を基に、高温超伝導線材の通電特性に関する物理モデルを確立し、磁場中電流輸送特性に及ぼす局所揺らぎの影響を定量的に明らかとする。さらに、各種高温超伝導線材への適用可能性を明らかとし、標準的臨界電流評価手法としての展開を図る。

3. 研究の方法

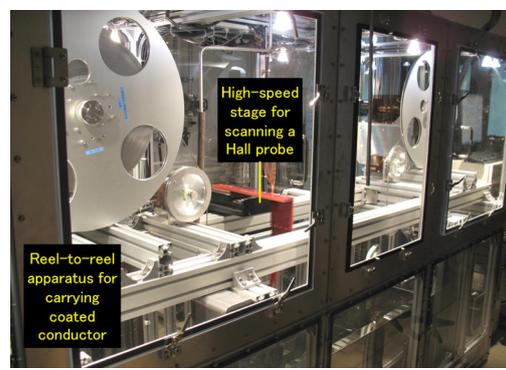
- (1) リール式高速磁気顕微システムの開発と高解像度・高速化
- (2) 局所 I_c 低下部位の特定と微細組織観察を複合化したハイブリッド顕微技術の確立
- (3) 希土類系高温超伝導(RE-123) 長尺線材の電流制限因子の解明とプロセス条件へのフィードバック
- (4) Bi-2223 高温超伝導多芯線材への適用可能

性の検証と長尺線評価への展開

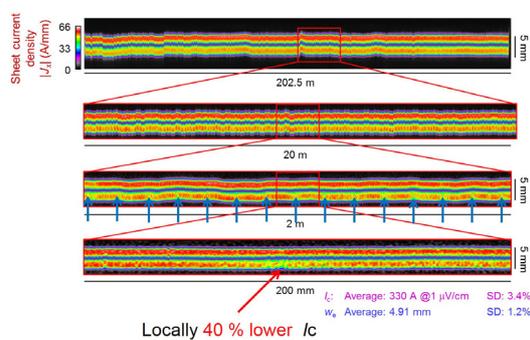
4. 研究成果

(1) リール式高速磁気顕微システムによる 200 m 級商用長尺 RE-123 線材の計測と電流制限因子の解明: リール式磁気顕微鏡と X 線マイクロトモグラフィを用いた 3 次元組織観察による複合評価を実施し、 200 m 級商用 RE-123 線材の局所的な I_c 低下箇所を検出し、微細組織のその場観察によって、電流制限機構を明らかとした。開発した磁気顕微システムと観測結果を Fig. 1 に示す。

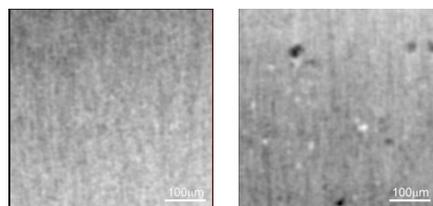
(2) 高均一 RE-123 線材の実現: 上述の知見を基に、プロセス条件を改善し、電流阻害因子を除去することによって、 35 m 長の極めて高均一な線材の作製に成功した。得られた I_c 分布の像を Fig. 2 に示す。



(a)



(b)



(c)

(d)

Fig. 1 (a) Reel-to-reel scanning Hall-probe microscopy (RTR-SHPM) system, (b) measurement result visualizing local I_c drop in a 202.5 m long commercial RE-123 coated conductor and X-ray micro-tomography of substrate surface at (c) high I_c and low I_c position, respectively.

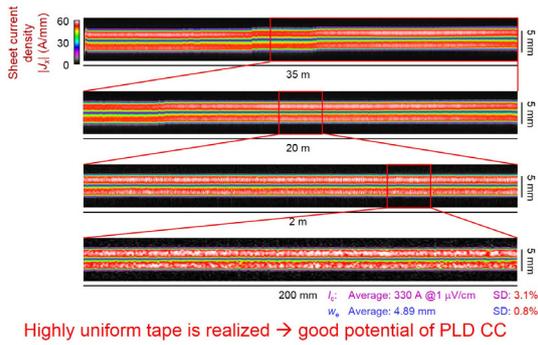


Fig. 2 Highly uniform 35 m long RE-123 coated conductor obtained from improved pulsed-laser-deposition process.

(3) 長尺線材における I_c 統計揺らぎの解明と統計的 I_c 分布に基づく電流輸送特性の物理モデルの確立：長尺線材の I_c 分布に関する測定結果について空間周波数解析を行い、短い周期の白色雑音的な揺らぎとは別に、長周期の揺らぎが存在し、長尺線材における最小 I_c 値は観測する線材長に依存することを見いだした。すなわち、長尺線材の実用性能を決定する最小 I_c 値は、その低い出現確率のため短尺試料による見かけ上の測定値では正しく評価出来ていないことを初めて指摘した。さらに、統計的考察によって有限長の試料の測定結果から無限長における最小 I_c 値を推定する手法を提案した。これは、長尺線材における局所 I_c 値の統計揺らぎを理論的に考察した初めての成果であると共に長尺線材を用いた機器設計の際の I_c 値のマーヅンに対する理論的根拠を与えるものであり、広い波及効果が期待できる。さらに、統計的 I_c 分布を基に、線材の電流輸送特性を記述するための物理モデルを確立し、任意の温度、磁場環境下における線材の電流輸送特性を高精度に記述し、予測する事も可能であることを実験との比較によって実証した。本手法は、希土類系高温超伝導線材の材料性能を表す指針として有効であるばかりでなく、冷熱発生、動作磁場、運転電流など総合的に考慮した機器の設計においても極めて有用である。

(4) 高磁場下の I_c 分布の評価：リール式磁気顕微鏡法を超伝導マグネットと組み合わせた高磁場下の測定に展開し、実用レベルの高磁界下(2T)において試料を連続搬送させながら I_c 長手分布を測定することに世界で初めて成功した。測定結果を Fig. 3 に示す。

(5) 細線加工線材の有効線幅の評価法の開発と加工プロセス条件の最適化：RE-123 線材は、典型的には 1 cm 幅で製造されるが、大容量電力ケーブルなどの応用において、複数のケーブルを集合導体化して使用される。この際に、スリット加工によって線幅を調整する細線加工が必要となるが、いかにダメージを与

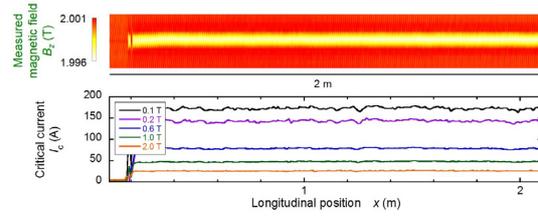


Fig. 3 Reel-to-reel in-field magnetic microscopy.

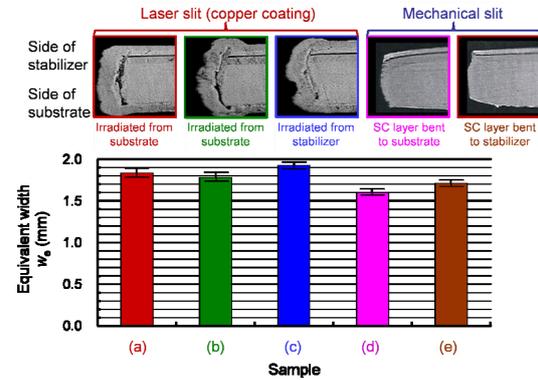


Fig. 4 Difference in the equivalent width for the samples slit by different cutting methods. Micrographs of the cross-section near the edge of the samples are also shown in the figure; the micrographs for Samples (a)-(c) were taken after copper coating which was done after slitting. The error bar in the equivalent width indicates the standard deviation for each sample estimated from the longitudinal distribution.

えずに加工するかが電流容量の確保のみならず、ケーブル応用時の交流損失低減のために重要な技術となる。本研究で開発した 2 次元的な I_c 評価技術をもとに、線材の電磁気的有効幅という新しい指標を提出し、細線加工時の線材端部の劣化を示す性能指標としての重要性を示すと共に、本評価手法を適用する事で、細線加工プロセスの最適化を実現した。加工法の異なる線幅 2 mm の細線加工線材に対し、連続に接続した試料を用いて一括に高速評価する手法を提案し、40 m 長の試料を用いて長尺線加工技術の評価手法としての実用性を実証した。Fig. 4 に様々な手法で 2 mm 幅に細線化された線材の有効線幅を示す。機械スリットよりもレーザースリットの方でダメージが少なく、またその中でも最適な条件のものを見出すことができた。

(6) マルチフィラメント線材の評価：超伝導線材の交流損失の低減のためには、線材の磁化を減少させるためフィラメント状に超伝導を分離する加工が求められる。この時、フィラメント幅が細くなるに従って、もはや四端子法では各フィラメントの I_c の測定は極めて困難となる。本研究では、高解像度の電流計測技術によってマルチフィラメント線材の評価を可能とした。Fig. 5 に 5 mm 幅 5 分割マルチフィラメント線材の評価結果を示す。

Fig. 5 上段の図を見るだけでも均一性の視認は可能であるが、同図中段、下段に示すように、局所 I_c と有効線幅の長手方向分布をフィラメントごとに定量的に示すことが可能であり、加工技術の最適化にはもちろんのこと、機器設計に直接反映することが可能となる。

また、開発した磁気顕微鏡を用い多芯線材の I_c 分布評価を行い、局所 I_c 低下位置を特定すると共に、マイクロサンプリングによる TEM 断面観察を行い、多芯加工時の I_c 低下の原因を明らかとした。

(7) Bi-2223 長尺線材の評価 : Bi 系高温超伝導多芯線材を用い、フィラメント間のカップリングのため、Bi 系多芯線材においても本手法が適用可能であることを検証すると共に、市販の 100m の Bi-2223 長尺テープ線材の評価を行い、テープ面内における I_c の 2 次元的空間分布の計測に初めて成功した。長尺線の高解像度計測によって、従来法では検出不可能な、長周期に離散的に点在する局所欠陥の検出にも成功し、実用長尺線の信頼性評価手法として、本手法は優れたポテンシャルを有する事を明らかとした。

(8) 今後の展開 : 本研究で開発した評価手法を用いることによって、超伝導線材の特性制限因子の解明に資することはもちろん、機器応用時の設計基準の設定や、細線化やマルチフィラメント化による高機能高温超伝導線材の開発、さらにはそれらの品質管理や出荷検査など、超伝導線材の応用展開のための基盤技術として広い波及効果が期待できる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 13 件)

- ① M. Inoue, K. Tanaka, K. Imamura, K. Higashikawa, S. Awaji, K. Watanabe, T. Taneda, M. Yoshizumi, T. Izumi, T. Kiss, Enhancement of In-field J_c in $Gd_{1-x}Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ Coated Conductor by Using Highly Oriented IBAD Substrate, *ICEC 25-ICMC 2014, Phys. Proc.*, 査読有, 2015, in press
- ② M. Inoue, K. Tanaka, K. Imamura, K. Higashikawa, K. Kimura, Y. Takahashi, T. Koizumi, T. Hasegawa, S. Awaji, K. Watanabe, M. Yoshizumi, T. Izumi, T. Kiss, Current Transport Properties of TFA-MOD Processed Long-length $Y_xGd_{1-x}Ba_2Cu_3O_y$ Coated Conductor Doped with $BaZrO_3$ Artificial Pinning Centers, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 査読有, Vol.25, 2015, 6605804 DOI: 10.1109/TASC.2014.2387054
- ③ K. Higashikawa, K. Katahira, M. Inoue, T. Kiss, 他 7 名, Nondestructive Diagnostics of Narrow Coated Conductors for Electric Power Applications, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 査読有, Vol.24, 2014, 6600704 DOI: 10.1109/TASC.2013.2291997

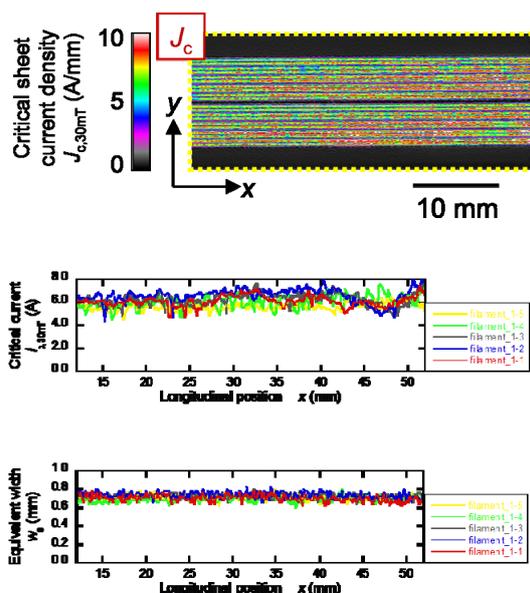


Fig. 5 Magnetic microscopy for 5-mm-wide 5-filamentary coated conductor: critical current density distributions obtained for 2 pieces, local critical current for each filament and equivalent width for each filament in the upper piece (from top panel to bottom).

- ④ A. Ibi, S. Miyata, T. Taneda, M. Yoshizumi, N. Chikumoto, Y. Yamada, T. Izumi, K. Taneda, Y. Shiohara, A. Yamamoto, K. Okumura, K. Higashikawa, T. Kiss, Development of High I_c Long REBCO Tapes with High Production Rate by PLD Method, *Physics Procedia*, 査読有, Vol.45, 2013, pp.145-148 DOI: 10.1016/j.phpro.2013.04.073
- ⑤ K. Higashikawa, K. Katahira, K. Okumura, K. Shiohara, M. Inoue, T. Kiss, 他 5 名, Lateral Distribution of Critical Current Density in Coated Conductors Slit by Different Cutting Methods, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 査読有, Vol.23, 2013, 6602704 DOI: 10.1109/TASC.2013.2238983
- ⑥ M. Inoue, Y. Yamaguchi, T. Sakakibara, K. Imamura, K. Higashikawa, T. Kiss, 他 5 名, Enhancement of In-Field Current Transport Properties in GdBCO Coated Conductors by $BaHfO_3$ Doping, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 査読有, Vol.23, 2013, 8002304 DOI: 10.1109/TASC.2013.2247456
- ⑦ 塩原 敬, 奥村慶太郎, 東川甲平, 木須隆暢, 走査型磁気顕微鏡を用いた超伝導テープ線材の局所電流分布計測におけるセンサー試料間距離の導出法に関する検討, *九州大学大学院システム情報科学紀要*, 査読有, Vol.18, 2013, pp.19-24 <http://catalog.lib.kyushu-u.ac.jp/recordID/26518>
- ⑧ K. Shiohara, K. Higashikawa, T. Kawaguchi, M. Inoue, T. Kiss, 他 2 名, Measurement of in-plane magnetic relaxation in RE-123

coated conductors by use of scanning Hall probe microscopy, *Physica C*, 査読有, Vol.484, 2013, pp.139–141

DOI: 10.1016/j.physc.2012.03.067

- ⑨ K. Higashikawa, K. Shiohara, M. Inoue, T. Kiss, 他 2 名, Estimation of Local Current Transport Properties in Thin Film Superconductor Based on Scanning Hall-probe Microscopy, *MRS Proceedings*, 査読有, Vol.1434, 2012, mrss12-1434-i03-04 (6 pages)

DOI: 10.1557/opl.2012.1587

- ⑩ K. Shiohara, K. Higashikawa, T. Kawaguchi, M. Inoue, T. Kiss, 他 2 名, Influence of Gas Flow and Improvement of Homogeneity on the Distribution of Critical Current Density in YBCO Coated Conductor Processed by TFA-MOD Method, *Physics Procedia*, 査読有, Vol.36, 2012, pp.1637-1642

DOI: 10.1016/j.phpro.2012.06.321

- ⑪ K. Higashikawa, K. Shiohara, Y. Komaki, K. Okumura, K. Imamura, M. Inoue, T. Kiss, 他 6 名, High-speed scanning Hall-probe microscopy for two-dimensional characterization of local critical current density in long-length coated conductor, *Physics Procedia*, 査読有, Vol.27, 2012, pp.228-231

DOI: 10.1016/j.phpro.2012.03.452

- ⑫ 木須 隆暢, 高温超電導材料 II—高温超電導体の臨界電流の特異性— (基礎講座), *TEION KOUGAKU (J. Cryo. Super. Soc. Jpn.)*, 査読有, Vol.47, 2012, pp.464-472

DOI: 10.2221/jcsj.47.464

- ⑬ K. Higashikawa, K. Shiohara, M. Inoue, T. Kiss, 他 6 名, Noncontact Characterization of In-Plane Distribution of Critical Current Density in Multifilamentary Coated Conductor, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 査読有, Vol.22, 2012, 9500704

DOI: 10.1109/TASC.2011.2176711

[解説] (計 2 件)

- ① 東川甲平, 井上昌睦, 木須隆暢, 走査型ホール素子顕微鏡による超伝導線材の局所 J_c 分布評価, *低温工学*, 査読有, Vol.49, 2014, pp.485-493

DOI:10.2221/jcsj.49.485

- ② 木須隆暢, 高温超電導テープ線材の局所 J_c 分布評価技術, *低温工学*, 査読有, Vol.49, 2014, pp.465-474

DOI:10.2221/jcsj.49.465

[学会発表] (計 127 件のうち招待講演 24 件)

- ① 木須隆暢 他, REBCO 線材の I_c 統計分布に対する試料長ならびに空間解像度の影響, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 2015.03.11, 東海大学, 神奈川

- ② Takanobu Kiss, Spatial variation of local critical current density in long length RE-123

coated conductor (invited), *Coated Conductor for Application 2014 (CCA 2014)*, 2014.12.03, Jeju Grand Hotel, Jeju, Korea

- ③ Takanobu Kiss, Challenges in RE-123 Coated Conductor Development—From the View Point of Electromagnetic Characterization—(Plenary talk), *27th Int. Sympo. on Superconductivity (ISS2014)*, 2014.11.25, Tower Hall Funabori, Tokyo, Japan

- ④ 木須隆暢 他, 長尺 RE-123 線材における局所 I_c 揺らぎの統計的振る舞い, *2014 年度秋季低温工学・超電導学会*, 2014.11.07, コラッセふくしま, 福島

- ⑤ K. Higashikawa et al., Spatial Homogeneity of Local Critical Current Density in Long Length RE-123 Coated Conductors (invited), *International Union of Materials Research Societies - The IUMRS International Conference in Asia 2014 (IUMRS-ICA 2014)*, 2014.08.26, Fukuoka University, Fukuoka, Japan

- ⑥ Takanobu Kiss, Challenges in HTS Conductor Development for Energy Applications (invited), *Applied Superconductivity Conference (ASC 2014)*, 2014.08.13, Charlotte, NC, USA

- ⑦ Takanobu Kiss, Spatial Homogeneity and In-Field Current Carrying Capability of RE-123 Coated Conductors (invited), *4th International Conference on Superconductivity and Magnetism (ICSM 2014)*, 2014.04.28, Antalya, Turkey

- ⑧ 木須隆暢 他, ハイブリッド顕微鏡による先進超伝導材料の電流制限因子の解明と高性能化 (invited), *2013 年第 60 回応用物理学会春季学術講演会*, 2014.03.17, 青山学院大学相模原キャンパス, 神奈川

- ⑨ Takanobu Kiss et al., Improvement of Spatial Homogeneity and In-field Critical Current in RE-123 Coated Conductors (invited), *Electronic Materials and Applications 2014 (EMA2014)*, 2014.01.24, DoubleTree by Hilton Orlando at Sea World, Orlando, Fla., USA

- ⑩ 木須隆暢, HTS 線材開発の現状(invited), *超伝導科学技術研究会第 82 回ワークショップ「超伝導電磁石の大型化への挑戦」*, 2013.12.26, 青全日通霞が関ビルディング 8 階大会議室 B, 東京

- ⑪ Takanobu Kiss et al., Spatial Homogeneity of Long Length RE-123 Coated Conductors (invited), *26th Int. Sympo. on Superconductivity (ISS2013)*, 2013.11.20, Tower Hall Funabori, Tokyo, Japan

- ⑫ Takanobu Kiss, Recent progress of R&D on HTS technologies in Japan as potential breakthrough for electric power networks linking renewable energy resources (invited), *Workshop on Super Grid for Northeast Asia*, 2013.11.01, University of Incheon, Incheon,

- Korea
- ⑬ Takanobu Kiss et al., Development of reel-to-reel high speed scanning Hall-probe microscope system as a diagnostic method of long RE-123 coated conductors, *11th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2013)*, 2013.09.17, Genova, Italy
 - ⑭ Takanobu Kiss et al., Recent advancement in laser processing of long-length high-performance RE-123 superconducting wires (invited), *The 14th International Symposium on Laser Precision Microfabrication (LPM 2013, part of LAMP 2013)*, 2013.07.24, Toki Messe, Niigata, Japan
 - ⑮ K. Higashikawa et al., Two-dimensional Homogeneity of Critical Current Density in Long Coated Conductors for Electric Power Applications, *Magnet Technology 23 (MT23)*, 2013.07.18, Boston, MA, USA
 - ⑯ Takanobu Kiss, Evaluation of Local Electromagnetic Properties in Superconducting Forefront Materials for the Understanding of Current Limiting Mechanism (invited), *16th US-Japan Workshop on Advanced Superconductors*, 2013.07.10, Univ. of Dayton Research Institute, Dayton, OH, USA
 - ⑰ Takanobu Kiss et al., Spatial Homogeneity of Critical Currents in Long RE-123 Coated Conductors, *Cryogenic, Engineering Conf. and Int. Cryogenic Materials Conf. (CEC/ICMC)*, 2013.06.19, Dena'ina Civic and Convention Center, Anchorage, Alaska, USA
 - ⑱ Takanobu Kiss et al., Recent Advancement of the Characterization Technology for Visualizing Local Electromagnetic Properties in Superconducting Forefront Materials (invited), *2013 MRS Spring Meeting*, 2013.04.05, Moscone West Convention Center/Marriott Marquis, San Francisco, California, USA
 - ⑲ 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)*, 2012.12.04, Tower Hall Funabori, Tokyo, Japan
 - ⑳ Takanobu Kiss, Recent advancement and future prospects of coated conductor technologies (invited), *Summit of Materials Science (SMS2012)*, 2012.11.30, Sendai, Japan
 - ㉑ Takanobu Kiss et al., Improvement of in-field current carrying capability and spatial homogeneity in IBAD based coated conductors (invited), *Conference on Coated Conductors for Applications (CCA2012)*,

- 2012.11.14, Heidelberg, Germany
- ㉒ K. Higashikawa et al., Reel-to-reel scanning Hall-probe microscopy for in-plane distribution of critical current density in long coated conductors (invited), *2012 Applied Superconductivity Conference (ASC2012)*, 2012.10.11, Portland, Oregon, USA
- ㉓ Takanobu Kiss et al., Present status and future prospects of critical currents in Gd1Ba2Cu3O7- δ coated conductors (invited), *IUMRS-ICEM 2012*, 2012.09.27, Yokohama, Japan
- ㉔ K. Higashikawa et al., Nondestructive RtR characterization of long GdBCO coated conductor, *The 2nd Korea Japan Superconducting Technologies for Electric Power System*, 2012.08.09, Chagwon National University, Changwon, Korea
- ㉕ Takanobu Kiss et al., Characterization of HTS wire for power device application, *2012 Japan-Korea Workshop on Superconducting Technologies for Electric Power System*, 2012.05.19, Fukuoka, Japan
- ㉖ Takanobu Kiss et al., Multi-scale, multi-physics characterization to realize high performance Gd1Ba2Cu3O7- δ coated conductors, *ICEC24-ICMC2012*, 2012.05.16, Fukuoka, Japan

[その他]
 ホームページ等
<http://hyoka.ofc.kyushu-u.ac.jp/search/details/K000239/>

6. 研究組織

- (1)研究代表者
 木須 隆暢 (KISS, Takanobu)
 九州大学・システム情報科学研究院・教授
 研究者番号：00221911
- (2)研究分担者
 井上 昌睦 (INOUE, Masayoshi)
 九州大学・システム情報科学研究院・准教授
 研究者番号：80346824
- (3) 研究分担者
 東川 甲平 (HIGASHIKAWA, Kohei)
 九州大学・システム情報科学研究院・准教授
 研究者番号：40599651
- (4) 研究協力者
 和泉 輝郎 (IZUMI, Teruo)
- (5) 研究協力者
 衣斐 顕 (IBI, Akira)
- (6) 研究協力者
 町 敬人 (MACHI, Takato)