

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 6 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26249042

研究課題名(和文) Y系高温超伝導線材の低交流損失・大電流量化に関する研究

研究課題名(英文) Study on AC loss reduction and current capacity enhancement of YBCO high-Tc superconducting tapes

研究代表者

岩熊 成卓 (Iwakuma, Masataka)

九州大学・システム情報科学研究所・教授

研究者番号：30176531

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,800,000円

研究成果の概要(和文)：Y系超伝導線材は扁平なテープ形状であり、従来の低温超伝導多芯線・撚線導体で常套手段であった低交流損失化のための多芯化、大電流量化のための撚線導体化の手法は適用できない。本研究では、独自の概念に基づき、Y系超伝導線材の低磁化・低交流損失化、大電流量化を図り、線材・導体の基本的電磁特性の評価と解明を行って、低周波から高周波に至るあらゆる応用に適応しうるY系高温超伝導線材・導体・巻線の基本的構成法を提示した。

研究成果の概要(英文)：The multifilamentization for low AC loss and the cabling assembly for enhancing current capacity, which have been adopted to conventional low-Tc superconducting wires, are inapplicable to REBCO superconducting wires with a tape shape. In this study, by proposing a tremendous concept, the reduction of magnetization and AC loss of REBCO superconducting tapes and the enhancement of current capacity were realized. The evaluation and analysis of the electromagnetic properties of REBCO superconducting tapes and parallel conductors brought us the desirable basic-structure of REBCO tapes, conductors and windings, which are useful for any applications at the wide range of frequency, i.e., DC to a commercial frequency.

研究分野：超伝導工学

キーワード：超伝導 YBCO 交流損失 電流分流 並列導体

### 1. 研究開始当初の背景

本研究は、ヘリウム資源枯渇が危惧される状況にあって、液体窒素温度領域でも動作し、従来の金属系低温超伝導線材・導体の発展的代替手段となり得る Y 系超伝導線材・導体の開発を目指したものである。扁平なテープ形状を有する Y 系超伝導線材には、金属系低温超伝導線材において常套手段であった低交流損失化のための多芯線化、大電流量化のための撚線導体化の手法は適用できず、本研究では独自の手法を適用して、この課題の克服を目指した。低交流損失化については、スクライビング加工によるマルチフィラメント化とフィラメント間インダクタンスを均等にしうる特殊巻線工程の組合せにより、また、大電流量化については、転位並列導体構造の採用により、両課題の同時解決を行った。すでに、これら低交流損失・大電流量化手法の商用周波(高周波)帯域における適用性については、3 相 66kV/6.9kV-2 MVA 超伝導変圧器の試作により検証を行った。しかしながら、これら Y 系超伝導線材・導体の電磁特性の解明に取り組む中で、交流応用よりむしろ逆に直流応用(低周波)において解決すべき課題が山積していることを見だし、本研究は、これら線材・導体を低周波から高周波に至るあらゆる応用に適応させるように、課題の抽出と解決を目指したものである。

### 2. 研究の目的

Y 系超伝導線材は、結晶構造とその異方性に由来して形状は扁平なテープであり、従来の金属系低温超伝導線材において常套手段であった低交流損失化のための多芯化、大電流量化のための撚線導体化の手法は適用できない。そのため、磁化による発生磁場の乱れ、交流損失ともに大きく、直流・交流用ともに容易に利用できない状況にあった。本研究では、独自の概念に基づき、Y 系超伝導線材の低磁化・低交流損失化、大電流量化を図り、この基本的電磁特性の評価と解明を行って、低温超伝導多芯線・撚線導体に代わる Y 系 高温超伝導線材・導体・巻線の構成法を明らかにすることを目的とした。

### 3. 研究の方法

(1) 窒化アルミ製試料ホルダーに組み込んだ鞍型ピックアップコイルを用いて、レーザスクライビングによりフィラメント分割した Y 系短尺線材、無分割 Y 系短尺線材について、磁化・交流損失の温度  $T$ 、磁場  $B$ 、磁場印加角度  $\theta$ 、積層枚数  $N$  依存性等を測定し、これを電磁特性の解析に取り込んだ。

(2) 窒化アルミ製試料ホルダーに組み込んだ鞍型ピックアップコイルを用いて、レーザスクライビングによりフィラメント分割した Y 系短尺線材、無分割 Y 系短尺線材について、外部磁場の掃引を停止した後の線材の磁化緩和(遮蔽電流の減衰)を温度  $T$ 、磁場  $B$ 、磁場印加角度、積層枚数  $N$  を変えて観測した。

(3) フィラメント分轄線材、無分轄線材を小型テストコイルに巻き、直流磁場・電流を印加して、コイル発生磁場の時間変化を高精度ホール素子で観測し、Y 系線材の磁化緩和(遮蔽電流の減衰)がコイル発生磁場に与える影響を調べた。

(4) 大電流量化のために転位並列導体を構成するに際し、低交流損失化、均等分流を実現するための基本転位パターンについて解析を用いて考察し、層内・層間 転位、および、これらを組み合わせた転位パターンについて検討するとともに、素線間での臨界電流  $I_c$ 、I-V 特性の傾き  $n$  値のばらつきが素線間の電流分流にどのような影響を与えるのかを理論的に調べた。

(5) スクライビングにより低交流損失化を図った線材、転位並列導体を構成して大電流量化を図った導体を、変圧器巻線、回転機電機子巻線等へ適用する場合の具体的適用法を検討するとともに、超伝導巻線の交流損失、電流分流等を解析により求め、その効果を調べた。

### 4. 研究成果

(1) レーザスクライビングによりフィラメント分割した短尺線材について、磁化・交流損失の温度  $T$ 、磁場  $B$ 、磁場印加角度  $\theta$  依存性等を測定し、磁化(遮蔽電流)・交流損失低減について、従来理論に照らし、図 1 に示すように分割の効果を検証するとともに、中心到達磁界がフィラメント幅に比例しないながらも、無分割線材と同様に、図 2 に示すように臨界電流密度  $J_c$ 、交流損失の温度スケール則が成立することを見いだした。また、従来の理論表式では説明できない中心到達磁界のフィラメント幅依存性を明らかにした(図 3)。 $J_c$ 、交流損失の温度スケール則と併せて、スクライビングにより低交流損失を図った線材の、任意の温度、磁界振幅、磁界印加角度における交流損失を予測する手法について定量的に検討し、これを全超伝導回転機概念設計および交流損失の見積りに適用した。

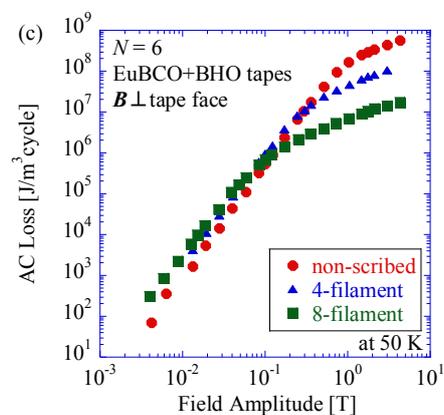


図 1 フィラメント分割による交流損失低減。無分割、4 分割、8 分割線材を 6 枚積層して測定した交流損失の磁界振幅依存性。

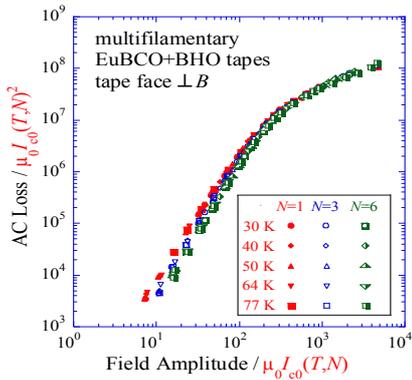


図2 ゼロ磁場の  $I_c$  で規格化した交流損失

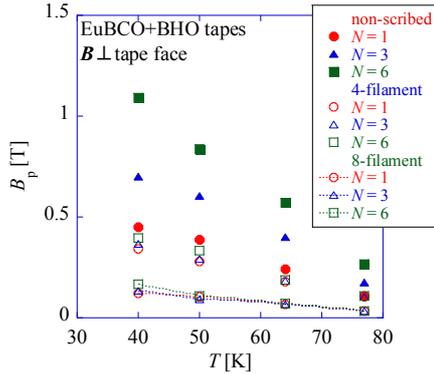


図3 フィラメント分割した線材の中心到達磁界  $B_p$  の温度、積層枚数依存性。

(2) 鞍型ピックアップコイルを用いて、外部磁場の掃引を停止した後の Y 系線材の磁化緩和 (遮蔽電流の減衰) を磁場  $B$ 、温度  $T$ 、積層枚数  $N$  を変えて観測した。その結果、遮蔽電流は磁場掃引停止直後から始まり、20K から 40K の温度領域でも 100 秒で 10%-20% 減衰した (図4)。また、温度、磁場が高いほど、積層枚数が少ないほど、減衰が速いことを明らかにした (図4,5)。

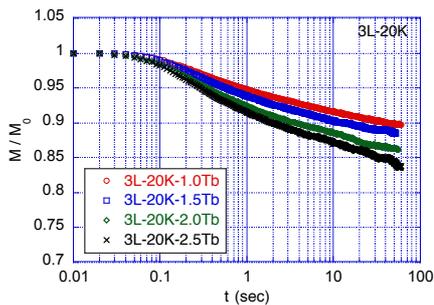


図4 20K における 3 枚積層線材の磁化緩和

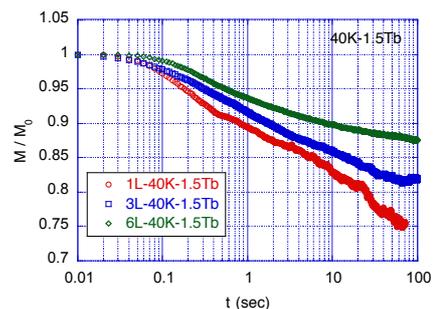


図5 40K における 1, 3, 6 積層線材の磁化緩和

(3) 図6に示すように、フィラメント分轄線材、無分轄線材を小型テストコイルに巻き、直流磁場・磁界を印加して、コイル発生磁場の時間変化を高精度ホール素子で観測し (図7)、Y 系線材の磁化緩和(遮蔽電流の減衰)がコイル発生磁場に与える影響を比較・検討した。その結果、フィラメント分轄により、誘起される遮蔽電流が抑制されるとともに、遮蔽電流の減衰も増進されることを明らかにした (図8)。また、遮蔽電流の減衰時定数を記述する磁束クリープ理論を取り入れた理論表式を導出するとともに、遮蔽電流の低減、速やかな減衰を図りうる手法を提示した。

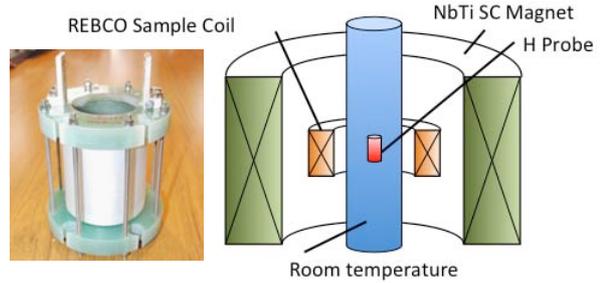
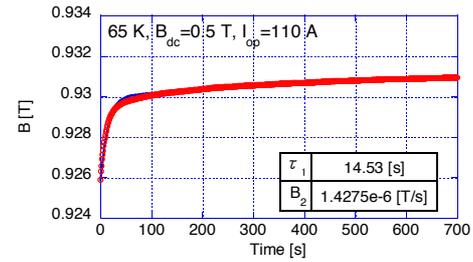
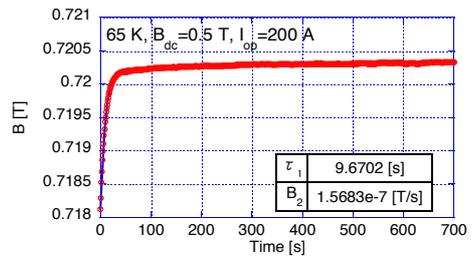


図6 Y 系線材で巻いた小型テストコイルと中心磁場計測のための実験構成図



(a)



(b)

図7 (a) フィラメント分割なし (b) 4 本フィラメント分割した線材で巻いたコイルの電流掃引停止後の中心磁場の時間変化 (遮蔽電流の減衰の様相)

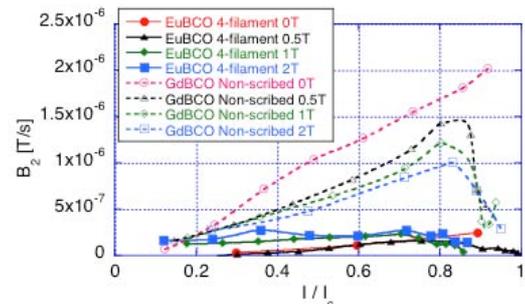
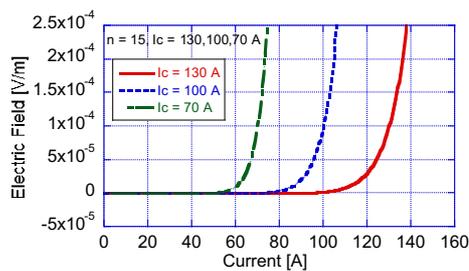
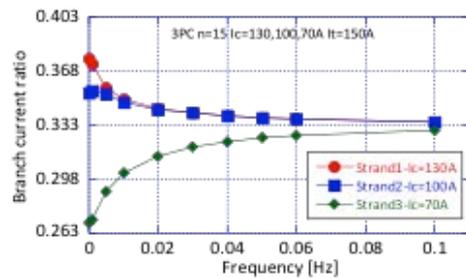


図8 遮蔽電流の通電電流、分割、磁場依存性

(4) 大電流量化を目指した転位並列導体を小型テストコイルに巻いた場合に、素線間での臨界電流  $I_c$ 、I-V 特性の傾き  $n$  値のばらつきが素線間の電流分流にどのような影響を与えるのかについて、等価回路モデルを提示し、数値解析により考察した。その結果、下記のような周波数依存性を見いだした。基本的な3本並列導体が最適位置で転位され、インダクタンス的には各素線が均等であるとしている。図9(a)に示すように素線間で  $I_c$  がばらつく場合、電流分流は、図9(b)に示すように高周波帯域では素線間で均等であるが、低周波帯域では  $I_c$  が大きい素線ほど電流が多く流れる。

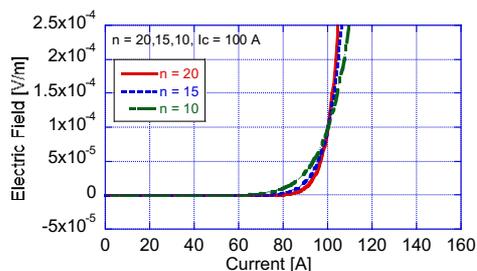


(a)

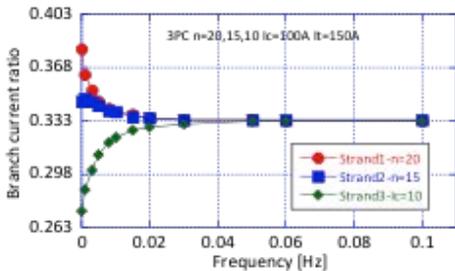


(b)

図9 3本並列導体の(a)素線  $I_c$  のばらつきと (b)電流分流の周波数依存性



(a)



(b)

図10 3本並列導体の(a)素  $n$  値のばらつきと (b)電流分流の周波数依存性

また、図10に示すように、素線間で  $I_c$  が同一でも  $n$  値がばらつく場合、やはり高周波帯域では電流は均等に流れるが、低周波帯域では  $n$  値が大きい素線に電流が多く流れる。

よって、転位並列導体を直流で使用するには、インダクタンスバランスのみならず、 $I_c$ 、 $n$  値のばらつきにも留意する必要があることがわかった。このばらつきによる電流偏流を回避するには、コイル仕上がり段階での電極付近での接続抵抗の調整が必要となるものと思われる。

(5) スクライビングにより低交流損失化を図った線材、転位並列導体を構成して大電流量化を図った導体を、変圧器巻線、回転機電機子巻線等へ適用する場合の具体的適用法について検討した。具体例として、2MWの全超伝導モータの概念設計とその交流損失特性解析例を示す。図11に定格運転時の全超伝導モータ内の磁界分布を、図12に電機子巻線の交流損失のギャップ磁束密度をパラメータにした回転数依存性を示している。二次元解析であるが、定量的に交流損失、すなわち効率を求める手法を確立した。

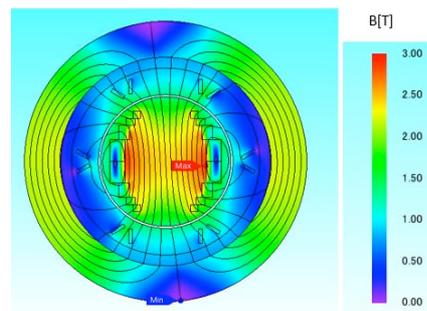


図11 2MW 2極全超伝導モータの磁界解析

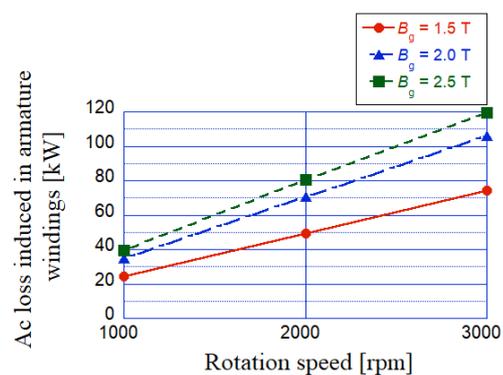


図12 2MW 全超伝導モータの電機子巻線における交流損失の見積り

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 11 件)(すべて査読あり)

① M. Iwakuma, Y. Tsukigi, K. Nabekura, T. Ueno, R. Shindo, F. Kawahara, S. Honda, K. Tamura, K. Yun, S. Sato, K. Yoshida, A. Tomioka, M. Konno, T. Izumi, T. Machi and A. Ibi, “Relaxation of Shielding Current in Test Coils for MRI with REBCO Superconducting Scribed Tapes”, IEEE Trans. Appl. Supercond.,

② M. Iwakuma, Y. Tsukigi, K. Nabekura, T. Ueno, R. Shindo, F. Kawahara, S. Honda, K. Tamura, K. Yun, S. Sato, K. Yoshida, A. Tomioka, M. Konno, T. Izumi, T. Machi and A. Ibi, “New Method for Quick Decay of Shielding Current in REBCO Superconducting Coils”, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 26, No. 4, Article No. 4403209, 2016

③ M. Iwakuma, T. Ueno, K. Yun, T. Izumi, Y. Shiohara, A. Ibi, “Decay of shielding current in stacked REBCO superconducting tapes”, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 26, No. 4, Article No. 4403304, 2016

④ M. Iwakuma, K. Nabekura, K. Yun, S. Sato, K. Yoshida, A. Tomioka, M. Konno, T. Machi, A. Ibi, and T. Izumi, “Scribing Effect on Shielding Current in REBCO Superconducting Coils”, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 27, No. 4, Article No. 4700806, 2017

⑤ S. Honda, Y. Fukumoto, M. Iwakuma, K. Yoshida, S. Sato, T. Izumi, A. Tomioka, M. Konno, “Current-Sharing Properties in Parallel Conductors Composed of REBCO Superconducting Tapes”, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 27, No. 4, Article No. 0601405, 2017

⑥ T. Ueno, T. Ito, K. Yun, K. Adachi, M. Iwakuma, A. Tomioka, Y. Hase, M. Konno, T. Izumi, T. Machi and A. Ibi, “AC Loss Properties of Stacked REBCO Superconducting Tapes”, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 27, No. 4, Article No. 4701806, 2017

⑦ S. Oki, S. Miura, M. Iwakuma, “Theoretical Analysis of Additional AC Loss Properties of Two-Strand Transposed Parallel Conductors Composed of REBCO Superconducting Tapes”, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 28, No. 3, Article No. 8201005, 2018

⑧ T. Ito, M. Iwakuma, S. Miura, T. Izumi, K. Adachi, T. Machi, A. Ibi, “Difference of AC Losses Between Nonstriated and Striated Tape and Applicability of Temperature Scaling Law to Stacked Striated Tape”, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 28, No. 3, Article No. 8200505, 2018

⑨ S. Fukuda, K. Yun, M. Iwakuma, S. Miura, S. Sato, K. Yoshida, A. Tomioka, M.

Konno, T. Izumi, “Design Study of 2MW Fully Superconducting Synchronous Motor”, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 28, No. 4, Article No. , 2018

⑩ H. Sasa, T. Ito, M. Iwakuma, S. Miura, T. Izumi, T. Machi, A. Ibi, “AC Loss Property of Stacked REBCO Superconducting Multifilamentary Tapes under Perpendicular Magnetic Field”, Journal of Physics:Conference Series, in press

⑪ A. Kawagoe, K. Inoue, Y. Higashi, M. Iwakuma, M. Konno, A. Tomioka, Y. Hase, T. Izumi, “Numerical Analyses on Influences of Armature Winding Shape and Yoke Arrangements on Total Losses in Fully Superconducting Synchronous Motors Using REBCO Tapes”, IEEE Trans. Appl. Supercond.,

[学会発表] (計 件)

① M. Iwakuma, Y. Tsukigi, K. Nabekura, T. Ueno, R. Shindo, F. Kawahara, S. Honda, K. Tamura, K. Yun, S. Sato, K. Yoshida, A. Tomioka, M. Konno, T. Izumi, T. Machi and A. Ibi, “Relaxation of Shielding Current in Test Coils for MRI with REBCO Superconducting Scribed Tapes”, 12th European Conference on Applied Superconductivity, 2015

② M. Iwakuma, Y. Tsukigi, K. Nabekura, T. Ueno, R. Shindo, F. Kawahara, S. Honda, K. Tamura, K. Yun, S. Sato, K. Yoshida, A. Tomioka, M. Konno, T. Izumi, T. Machi and A. Ibi, “New Method of Operating REBCO Superconducting Coils for MRI to Reduce Shielding Current”, International Conference on Magnet Technology 24, 2015

③ M. Iwakuma, T. Ueno, K. Yun, T. Izumi, Y. Shiohara, A. Ibi, “Decay of shielding current in stacked REBCO superconducting tapes”, International Conference on Magnet Technology 24, 2015

④ M. Iwakuma, “AC & DC applications of REBCO superconducting tapes”, ISS2015, 2015

⑤ 伊藤哲也、上野達人、岩熊成卓、町敬人、衣斐頭、和泉輝郎、“鞍型ピックアップコイル法による REBCO 超伝導テープ線材の磁化・交流損失特性の評価”、第 93 回低温工学・超電導学会研究発表会、2016

⑥ M. Iwakuma, “Superconducting Magnets and Coils -Electromagnetic properties of superconducting wires and cables in windings-”, 1st ASIA Superconductivity Summer School, 2016

⑦ M. Iwakuma, K. Nabekura, K. Yun, S. Sato, K. Yoshida, A. Tomioka, M. Konno, T.

Machi, A. Ibi, and T. Izumi, "Scribing Effect on Shielding Current in REBCO Superconducting Coils", Applied Superconductivity Conference, 2016

⑧ T. Ueno, T. Ito, K. Yun, K. Adachi, M. Iwakuma, A. Tomioka, Y. Hase, M. Konno, T. Izumi, T. Machi and A. Ibi, "Ac Loss Properties of Stacked REBCO Superconducting Tapes", Applied Superconductivity Conference, 2016

⑨ M. Iwakuma, "Electrical measurement of ac loss in triaxial superconducting cables", 1st Asian ICMC CSSJ50, 2016

⑩ M. Iwakuma, "Development of a 3φ-66/6.9kV-2MVA REBCO Superconducting Transformer", 1st Asian ICMC CSSJ50, 2016

⑪ S. Honda, Y. Fukumoto, M. Iwakuma, K. Yoshida, S. Sato, T. Izumi, A. Tomioka and M. Konno, "Current sharing properties in parallel conductors composed of REBCO superconducting tapes", 1st Asian ICMC CSSJ50, 2016

⑫ 佐川慎太郎、岩熊成卓、本田正太郎、吉田幸市、佐藤誠樹、和泉輝郎、富岡章、今野雅行、"酸化物超伝導並列導体の電流分流特性の解析"、平成 29 年電気学会全国大会、2017

⑬ S. Oki, S. Miura, M. Iwakuma, "Additional ac loss properties of REBCO superconducting two-strand parallel conductors", International Conference on Magnet Technology 25, 2017

⑭ S. Fukuda, M. Iwakuma, S. Miura, S. Sato, K. Yoshida, Y. Hase, A. Tomioka, M. Konno and T. Izumi, "Design Study of 2MW Fully Superconducting Synchronous Motor", 13th European Conference on Applied Superconductivity, 2017

⑮ M. Iwakuma, "Development toward All Superconducting Motors in Japan", CEC/ICMC-2017, 2017

⑯ M. Iwakuma, "Development toward All Superconducting Motors in Japan", CEC/ICMC-2017, 2017

⑰ 沖総一郎、三浦峻、岩熊成卓、"Y 系超伝導転位並列導体で構成したコイルの付加的交流損失特性 (4)"、第 95 回低温工学・超伝導学会研究発表会、2017

[その他]

ホームページ等

<http://www.sc.kyushu-u.ac.jp>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

岩熊 成卓 (Iwakuma, Masataka)

九州大学・大学院システム情報科学研究  
院・教授

研究者番号：30176531

### (2) 研究分担者

川越 明史 (Kawagoe, Akifumi)

鹿児島大学・学術研究院理工学域工学系・  
准教授

研究者番号：40315396