

令和 元年 6 月 19 日現在

機関番号：10101

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2016～2018

課題番号：15KK0192

研究課題名（和文）ナノ医用診断のためのSQUID磁気センサの高性能化設計用シミュレーションの開発（国際共同研究強化）

研究課題名（英文）Development of simulation tool to design high-performance SQUID magnet sensors for nano medical diagnosis(Fostering Joint International Research)

研究代表者

野口 聡 (Noguchi, So)

北海道大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：30314735

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,200,000円

渡航期間： 16ヶ月

研究成果の概要（和文）：高温超伝導体で超高磁場を発生し、MRIやNMRなどに応用できれば、医療や製薬分野での大きな進展が期待できる。そこで、これまでに超伝導磁気センサ(SQUID)を高性能化するために開発してきた電磁界シミュレーション・ツールを、高磁場発生用マグネットの解析に応用した。超高磁場発生用高温超伝導マグネットでは、近年提案された無絶縁巻線技術が非常に効果的である一方、非常に複雑な現象を引き起こし、解析で挙動を明らかにすることが求められてきた。そこで、電磁気、熱、応力の連成シミュレーション・ツールを新たに開発した。世界最高DC磁場（45.5テスラ）の発生に成功する共に、解析によりその電磁的挙動を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究期間内、世界最高DC磁場となる45.5テスラの発生に携わるとともに、その電磁的挙動解明に貢献してきた。現在、REBCOと呼ばれる第二世代高温超伝導の利用が、更なる高磁場発生やヘリウム・フリー化に期待されている。そこで、世界最高DC磁場の発生は、REBCOのポテンシャルを示すだけでなく、MRIやNMR、加速器などへの高磁場化が望まれる装置への実用化への大きな一歩となった。その中で、本研究では、主に解析から複雑な電磁的、熱的、応力現象を明らかにすることで、REBCOマグネットによる更なる高磁場発生や応用装置の実用化への加速化に貢献できた。

研究成果の概要（英文）：High-field magnets are desired to apply to MRI and NMR for medical or medicine-making fields. Based on the background, the simulation tool which I have developed to design SQUID magnetometers is applied for quench analyses of high-field high-temperature superconducting (HTS) magnets. The no-insulation winding technique is very effective in generation of high field using HTS magnet. Meanwhile, very complicated behaviors were observed. Therefore, to clarify such complicated behaviors, I have enhanced my developed simulation tool by combining electromagnetic simulation with thermal and stress ones. As a result, it was successful to generate a world record DC field (45.5 teslas), and the complicated behaviors were clarified.

研究分野：超伝導工学

キーワード：高温超伝導 数値解析 高磁場発生

## 様式 F-19-2

### 1. 研究開始当初の背景

第二世代高温超伝 (REBCO) テープ線を利用した高磁場マグネットの開発が進められてきたが、安定性や保護の面からマグネット作製が困難であった。しかし、Massachusetts Institute of Technology (MIT) の Iwasa 氏と Hahn 氏が無絶縁巻線技術を提案し、REBCO の熱的安定性が飛躍的に向上し、REBCO マグネットの高磁場化が現実的になってきた。その際に、REBCO マグネット内に誘起される遮蔽電流が作る不正磁場が新たな問題となってきた。

そして、研究開始当初は無絶縁巻線技術を用いて、MIT では 1.3GHz NMR マグネット (30.5 テスラ) および Florida State University (FSU) では、45 テスラ超の発生マグネットの開発をしており、超高磁場マグネットの開発が始まった。

### 2. 研究の目的

(1) 超高磁場発生用 REBCO マグネットで不正磁場を作る遮蔽電流の振る舞いを、電磁界シミュレーションを通じて明らかにすることが研究の目的であった。さらに、遮蔽電流の低減もしくは遮蔽電流磁場の低減を明らかにすることも同様に研究目的であった。

(2) さらに、新しく提案された無絶縁巻線技術の電磁的挙動をシミュレーションにより明らかにし、その熱安定化メカニズムも明確化することも目的であった。

### 3. 研究の方法

(1) 第二世代高温超伝 (REBCO) を使用した超伝導磁気センサ (SQUID) の高性能化のために、電磁界シミュレーション・ツールを開発してきた。そのシミュレーション・ツールを応用することで、REBCO テープ線を使用した高磁場発生用マグネット内に誘導される遮蔽電流磁場を評価できることが明らかになり、遮蔽電流磁場の評価用シミュレーション・ツールへと発展させる。そして、前述した MIT の 1.3GHz NMR マグネットと FSU の 45T マグネットの実験結果と比較する。

(2) これまでに無絶縁巻線技術を用いた REBCO マグネットの解析手法として、Partial Element Equivalent Circuit (PEEC) 手法を提案してきた。この PEEC 手法に、熱解析を連成させ、マグネットの熱的安定性を評価する。

### 4. 研究成果

(1) REBCO マグネット内の遮蔽電流解析を実施するために、これまで SQUID 解析用に開発した有限要素法を発展させた。さらに、薄膜近似法を利用することで、遮蔽電流の解析に成功した。しかし、この手法では、軸方向磁場による電流拡散影響が出ないことから、新たな定式化を実施することで、軸方向磁場の影響を考慮した遮蔽電流解析手法を提案した。

図 1 に、遮蔽磁場が作る不正磁場を示す。青線が従来の解析手法 (軸方向磁場の影響を無視)、赤線が提案手法の結果 (軸方向磁場を考慮)、緑線が実験結果である。明らかに提案手法により、解析精度が向上している。

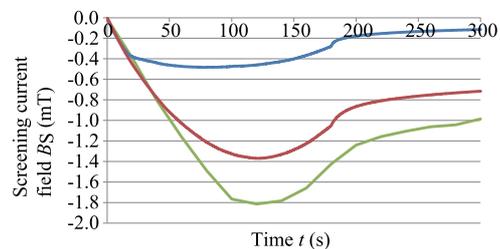


図 1 遮蔽電流のつくる不正磁場

(2) 軸方向磁場を考慮した遮蔽電流解析手法は、大変に複雑であり、一般的な研究者の利用が困難であると、MIT および FSU の研究者らから指摘を受けた。そこで、汎用的かつ利用容易な遮蔽電流磁場解析手法の開発を実施した。開発した提案手法では、遮蔽電流経路をモデル化し、そのインダクタンスを求めることで、等価回路を流れる電流として遮蔽電流を表現することに成功した。この結果は、MIT の 1.3GHz NMR マグネットや FSU の 45T マグネットの遮蔽電流磁場計測結果と非常に良い一致を得た。そして、ホームページで公開した。この手法は、か国内外の研究者に強いインパクトを与え、多くの研究者がホームページを通じて開発した手法を利用している。

(3) 無絶縁巻線技術を用いることで、REBCO マグネットが高度に安定化させるメカニズムを明らかにするために、PEEC 手法に熱解析を連成させる手法を開発した。図 2 に示すような、電流分布図や温度分布図を解析により得ることができ、熱的安定性のメカニズムを解明できるようになった。無絶縁巻線技術を用いた REBCO マグネット内では、局所的な温度が焼損に至る温度に到達する前に、径方向に電流が迂回することで、局所的な高発熱を防いでいることが明らかになった。

(4) 上記の安定化メカニズムが明らかになったが、MIT の 1.3GHz NMR マグネットや FSU の 45T マグネットは予期せず破損するに至った。従来の高磁場 REBCO マグネットは、クエン

チ後に焼損することが多かったが、無絶縁巻線技術を使用することで、焼損ではなく、機械的な破損が起こった。このメカニズムを明らかにするために、電磁場、熱、応力の連成シミュレーション・ツールを開発した。

このシミュレーション・ツールの開発中に、世界最高 DC 磁場となる 45.5 テスラの発生に携わった。この結果は、大きなインパクトをもたらした。REBCO マグネットのポテンシャルを国内外に示すに至った。この結果は、Nature 誌に投稿され、掲載決定となっている。

さらに、開発した電磁場、熱、応力の連成シミュレーション・ツールの有効性が認められ、2018 Applied Superconductivity Conference で招待講演を実施した。

しかし、未だに解決されていない問題があることから、更なる高精度開発手法の開発が必要である。その結果が、超高磁場の安定的発生につながるであろう。現在、それらの議論の場として、国際的シンポジウムの開催を検討している。

(5) 上記の電磁場、熱、応力の連成シミュレーション・ツール開発の成功により、無絶縁巻線技術の適用範囲が新たな問題となった。そこで、安定性限界を調査した結果、径方向の特性抵抗（接触抵抗）が安定性限界に大きく寄与していることを明らかにした。しかし、特性抵抗を計測する良い手法が存在しなかったことから、低周波電流を通電する新しい接触抵抗測定手法を提案した。将来的に、同手法を利用することで、接触抵抗の温度依存性や磁場依存性などが明らかになるであろう。そして、接触抵抗の詳細な振る舞いが明らかになれば、将来の超高磁場発生時の安定性評価がより正確に行えることが期待できる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者は下線)

[雑誌論文] (計 12 件)

- ① Seungyong Hahn, Kwanglok Kim, Kwangmin Kim, Xinbo Hu, Thomas Painter, Iain Dixon, Seokho Kim, Kabindra Bhattarai, So Noguchi, Jan Jaroszynski, David Larbalestier, “World Record DC Magnetic Field using an REBa2Cu3Ox (RE = Y, Gd) Superconducting Magnet,” Nature, 査読有, vol. 570, 2019.  
DOI: 10.1038/s41586-019-1293-1
- ② So Noguchi, Ryosuke Miyao, Haruyoshi Okusa, Takahiro Tatsuta, Hiroshi Ueda, SeokBeom Kim, “Turn-to-Turn Contact Resistance Measurement of No-Insulation REBCO Pancake Coils,” IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査読有, vol. 29, Art no. 4601605, 2019.  
DOI: 10.1109/TASC.2019.2903643
- ③ So Noguchi, Hiroshi Ueda, Seungyong Hahn, Atsushi Ishiyama, Yukikazu Iwasa, “A simple screening current-induced magnetic field estimation for REBCO pancake coils,” Superconductor Science and Technology, 査読有, vol. 32, Art no. 045007, 2019.  
DOI: 10.1088/1361-6668/aafe26
- ④ So Noguchi, Seungyong Hahn, Hiroshi Ueda, SeokBeom Kim, Atsushi Ishiyama, “An Extended Thin Approximation Method to Simulate Screening Current Induced in REBCO Coils,” IEEE Transactions on Magnetics, 査読有, vol. 54, Art no. 7201904, 2018.  
DOI: 10.1109/TMAG.2017.2752083
- ⑤ So Noguchi, Kwangmin Kim, Seungyong Hahn, “Simulation on Electrical Field Generation by Hall Effect in No-Insulation REBCO Pancake Coils,” IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査読有, vol. 28, Art no. 4901805, 2018.  
DOI: 10.1109/TASC.2018.2799573
- ⑥ Ryosuke Miyao, Hahjime Igarashi, Atsushi Ishiyama, So Noguchi, “Thermal and Electromagnetic Simulation of Multistacked No-Insulation REBCO Pancake Coils on Normal-State Transition by PEEC Method,” IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査読有, vol. 28, Art no. 4601405, 2018.  
DOI: 10.1109/TASC.2017.2781240
- ⑦ Jiho Lee, Dongkeun Park, Phillip C. Michael, So Noguchi, Juan Bascunan, Yukikazu Iwasa,

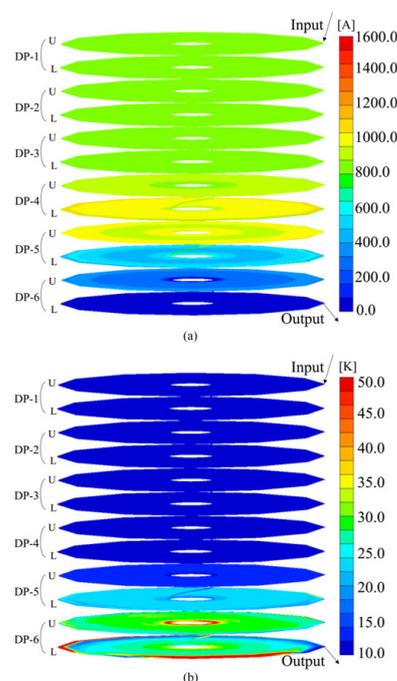


図 2 (a)電流分布、(b)温度分布

“A Field-Shaking System to Reduce the Screening Current-Induced Field in the 800-MHz HTS Insert of the MIT 1.3-GHz LTS/HTS NMR Magnet: A Small-Model Study,” IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査読有, vol. 28, Art no. 4301105, 2018. DOI: 10.1109/TASC.2018.2803801

- ⑧ So Noguchi, Vlatko Cingoski, “Simulation of Screening Current Reduction Effect in REBCO Coils by External AC Magnetic Field,” IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査読有, vol. 27, Art no. 4701405, 2017. DOI: 10.1109/TASC.2017.2650864

〔学会発表〕（計 14 件）

- ① So Noguchi, Ryosuke Miyao, Hyakuichi Tachiki, Hajime Igarashi, “Electromagnetic, Thermal, and Mechanical Quench-Protection Simulation of NI Pancake Coils for High Magnetic Field Generation,” 2018 Applied Superconductivity Conference (招待講演), Seattle, USA, Nov. 2018.
- ② Seungyong Hahn, Kwanglok Kim, Kwangmin Kim, Xinbo Hu, Thomas Painter, Iain Dixon, Seokho Kim, Kabindra Bhattarai, So Noguchi, Jan Jaroszynski, David Larbalestier, “World record DC (45.5 T) magnetic field using a REBCO insert inside a 31 T resistive magnet,” Coated Conductors for Applications, Vienna, Austria, Sep. 2018.
- ③ So Noguchi, Seungyong Hahn, Atsushi Ishiyama, Yukikazu Iwasa, “Numerical Analysis of Current Distribution and Stability in No-Insulation Coils Wound with REBCO Wires,” 30th International Symposium on Superconductivity (招待講演), Tokyo, Japan, Dec. 2017.
- ④ S. Noguchi, K. Monma, K. Katsumata, A. Ishiyama, “A Facile Stability Evaluation Method for NI REBCO Pancake Coils during Local Normal-state Transition,” 2016 Applied Superconductivity Conference, Denver, USA, Sep. 2016.
- ⑤ K. Kawaguchi, S. Noguchi, H. Igarashi, “Simulation on Screening Current Reduction Effect in REBCO Coils by External AC Magnetic Field,” 2016 Applied Superconductivity Conference, Denver, USA, Sep. 2016.

〔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：  
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：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<https://hbd.ist.hokudai.ac.jp/scifweb/>

## 6. 研究組織

研究協力者

〔主たる渡航先の主たる海外共同研究者〕

研究協力者氏名：岩佐 幸和

ローマ字氏名：(IWASA, Yukikazu)

所属研究機関名：Massachusetts Institute of Technology

部局名：Plasma Science and Fusion Center

職名：Research Professor

研究協力者氏名：Seungyong Hahn

ローマ字氏名：(HAHN, Seungyong)

所属研究機関名：National High Magnet Field Laboratory/Florida State University

部局名：Applied Superconductivity Center

職名：Associate Professor

研究協力者氏名：David Larbalestier

ローマ字氏名：(LARBALESTIER, David)

所属研究機関名：National High Magnet Field Laboratory/Florida State University

部局名：Applied Superconductivity Center

職名：Professor

[その他の研究協力者]

研究協力者氏名：宮尾 亮介

ローマ字氏名：(MIYAO, Ryosuke)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。