

令和 2 年 5 月 29 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06222

研究課題名（和文）高磁場・高温超伝導マグネットの高度電磁場解析技術に関する研究

研究課題名（英文）Study on advanced electromagnetic analysis for high-field HTS magnet

研究代表者

植田 浩史（Ueda, Hiroshi）

岡山大学・自然科学研究科・准教授

研究者番号：10367039

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、高温超伝導コイルで問題となる遮蔽電流を起因とした、電流分布、不整磁場分布、不均一電磁力の課題を評価・解決するための解析を実施した。具体的には、以下の3つの成果を上げた。マルチフィラメント間のブリッジを渡る結合電流の複雑な振舞いを薄板近似を用いて考えた。磁場の時間安定性の評価の高精度化のために、電流-電圧特性としてパーコレーションモデルを適用し、従来のべき乗則（n値モデル）とは異なる振る舞いをすることを示した。REBCOコイルの巻線時の張力、冷却時の熱応力、励磁時の遮蔽電流を考慮した電磁力により、REBCO線材が受ける応力・ひずみを数値解析によって評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高磁場は物質・材料系の物性研究や高エネルギー物理などの科学技術分野や医療分野に利用される。現在、高磁場超伝導マグネットの研究開発が世界各国で進んでいる。そのような中で、超伝導の電磁場数値解析の重要性の認識が高まってきており、現在多くの研究者によって数値解析を利用した超伝導機器の研究開発が進められるようになってきた。本研究で得られた成果は、数値解析により、これまで未解明であった高温超伝導多芯線の複雑な電流分布、線材内不均一電磁力による劣化の予測などに活用できるものであり、現在世界各国で進められているマグネット開発に資するものである。

研究成果の概要（英文）：In this study, the numerical simulation technique for the current distribution, the inhomogeneity of magnetic field and nonuniform force in HTS winding due to a screening current in HTS coil was developed. The following issues was carried out: 1) The multifilamentary HTS tape with bridge was modeled. And we discuss coupling current distribution from numerical simulation on the multifilamentary HTS coil which is given the local electrical contact between filaments. 2) The temporal stability of screening-current-induced field was investigated by using the percolation model as nonlinear voltage-current characteristic in HTS tape. 3) The electromagnetic force and stress due to screening current was evaluated by using the developed an electromagnetic and stress numerical simulation code. We discuss the winding tension, thermal and electromagnetic stresses, and the mechanical strength structure of REBCO coil.

研究分野：超伝導工学

キーワード：高温超伝導マグネット 不整磁場 マルチフィラメント 時間安定性 電磁力

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

高磁場は物質・材料系の物性研究や高エネルギー物理などの科学技術分野や医療分野に利用される。現在、高温超伝導線材を用いた高磁場超伝導マグネットの研究開発が世界各国で進んでいる。高温超伝導マグネットについて、米国エネルギー省 (DOE) の報告書 (Accelerators for America's Future Report (2010)や Accelerator R&D Task Force Report (May 2012)) では直流(DC)マグネット応用が最も有望であると指摘されている。高温超伝導 DC マグネット応用としては、研究用高磁場コイル、核磁気共鳴 (NMR)、磁気共鳴イメージング (MRI)、加速器 (サイクロトロン、ビーム輸送系)、超伝導エネルギー貯蔵装置 (SMES) などが挙げられる。高温超伝導 DC マグネットの利点としては、1) 低温金属系超伝導体の臨界磁場 23 T 以上の高磁場を発生させることができる、2) 冷却の簡素化 (小型冷凍機による伝導冷却が容易、ヘリウム以外の冷媒が使用可能)、3) 熱的な擾乱に対する高い安定性が挙げられる。高温超伝導線材の中でも、特に希土類系高温超伝導 (REBCO) 線材は、優れた機械特性と、高い磁場中臨界電流密度を有することから、高磁場マグネットへの応用が開発当初から期待され、現在は市販されるに至っている。また機械強度に課題のあった Bi2223 線材も機械特性を向上させる試みがあり、超高強度超伝導線 DI-BSCCO Type HT-NX が販売されている。このようにマグネット応用に適した高温超伝導線材が供給されるようになり、米国国立強磁場研究所 (NHMFL) で進行中の 32 T 超伝導マグネット開発をはじめとして、世界中で強磁場超伝導マグネット開発が進んでいる。また、米国 MIT では REBCO 線材を使ったコンパクトな核融合反応炉 (ARC Reactor) が提案されている (<http://news.mit.edu/2015/small-modular-efficient-fusion-plant-0810>)。日本では、科学技術振興機構 (JST) で高磁場・コンパクト NMR システムの開発、東北大学・金属材料研究所で 25 T 無冷媒超伝導磁石システムの整備、日本医療研究開発機構 (AMED) で超高磁場・高温超伝導 MRI の研究プロジェクト、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) で次世代フライホイール蓄電システムの開発が進行中である (いずれも研究開発当初 2016 年時点の情報である)。

2. 研究の目的

超伝導マグネットの研究開発が進んでいく中で、超伝導の電磁場数値解析の重要性の認識が高まってきており、現在多くの研究者によって数値解析を利用した超伝導機器の研究開発が進められるようになってきた。しかし、超伝導特有の導体構造や電磁現象に由来する課題、具体的には、(1) マルチフィラメント線材の解析、(2) 幅広い温度・磁場に対する超伝導特性の数理モデル、(3) 薄膜線材の機械特性解析、などが依然として課題として残っている。そこで本研究では、これまでの研究成果と高温超伝導の電磁場数値解析技術の現状を踏まえ、超伝導マグネット解析に際して上記 3 つの課題に取り組んだ。

3. 研究の方法

(1) 幅広い温度・磁場に対する超伝導特性の数理モデル

超伝導体を含む電磁場解析では、超伝導の電磁現象を巨視的電磁現象ととらえ (古典電磁気学)、Maxwell 方程式が成り立つものとして扱う。Maxwell 方程式を解くには、超伝導体についての物質方程式 (構成方程式) が必要である。超伝導の特徴は、物質方程式の内、電界 E と電流密度 J との関係を与えるもので表現され、 n 値モデル (電界 E が電流密度 J の n 乗に比例するべき乗則で近似する) やパーコレーションモデルが提案されている。最近では、低電界側の磁束クリープ現象を組み込んだパーコレーションモデルも提案されている。特にドリフトを議論する場合は、電流-電圧特性の低電界部の特性が支配的になるため、パーコレーションモデルが有効と考えられる。本研究では、これらの超伝導の電流-電圧関係のモデルとして n 値モデルやパーコレーションモデルに焦点を当て、高温超伝導マグネットの励磁時、励磁完了後の磁場の時間安定性を評価した。

(2) マルチフィラメント線材

高温超伝導線材は、超伝導層が 1~2 μm の厚さのテープ形状であるため、大電流化のために積層導体を用いるが、そのための新しい導体構造が提案されている。このような導体やコイル巻線は薄い線材と絶縁材や含浸材の多重構造になっている上、超伝導線材は機器の大きさに比べて極めて小さいため、線材すべてモデル化することは現実的ではなく、未だ適切な計算モデルは提案されていない。そこで、本研究では、このようなマルチフィラメント線材の新しい計算モデルを開発した。

(3) 電磁場・熱・機械連成解析

超伝導の電磁特性、熱特性と機械特性は密接に関係しているにもかかわらず、その複雑さから十分な連成解析は行われていない。そこで、巻線張力による内部応力、曲げひずみ、冷却時の熱応力、励磁時の電磁力を考慮した、コイル内の巻線間の接触を表現する簡易モデル、アルゴリズムを適用した線材レベルの応力解析手法を開発した。

4. 研究成果

(1) 幅広い温度・磁場に対する超伝導特性の数理モデル

一般に高温超伝導体の電流-電圧特性は、輸送電流を増加させていった場合にシャープな超伝導-常電導転移を示さず、電流密度 J が臨界電流密度 J_c より小さくても、超伝導体中に生じる電界 E はゼロにならず、徐々に抵抗が発生し電圧が上昇していく。このような超伝導体内の電磁現

象 ($E-J$ 特性) を記述するモデルとしては、べき乗則で近似したモデル (以下、 n 値モデルと呼ぶ) があり、次のように表される。

$$E = E_c \left(\frac{J}{J_c} \right)^n \quad (1)$$

ここで、 E_c は超伝導体の臨界電流密度 J_c を定義する基準値である。この基準値として例えば $1 \mu\text{V/cm}$ が用いられる。上式中で与えられている指数 n を n 値と呼び、高温超伝導体の非線形性を示すパラメータとして、 J_c とともに用いられている。しかし、 n 値モデルはある電界範囲に限られる。一般には磁束フローが発生しているような高電界から臨界状態に近い低電界の間で n 値を一定として考えることはできず、 n 値は電界に依存して変化する。このような $E-J$ 特性を両対数で描くと、図1のようなになる。このような広範囲にわたる複雑な $E-J$ 特性を記述するためには、式(1)において n 値に電界依存性を持たせることも考えられるが、より正確に記述するモデルとして、ここでは、磁束クリープを考慮していないパーコレーションモデルに基づく $E-J$ 構成関係を採用した。

$T \leq T_{GL}$ のとき、

$$E = \frac{\rho_{FF}}{m+1} J \left(\frac{J}{J_0} \right)^m \left(1 - \frac{J_{cm}}{J} \right)^{m+1} \quad (2a)$$

$T > T_{GL}$ のとき、

$$E = \frac{\rho_{FF}}{m+1} |J_{cm}| \left(\frac{|J_{cm}|}{J_0} \right) \left\{ \left(1 + \frac{J}{|J_{cm}|} \right)^{m+1} - 1 \right\} \quad (2b)$$

ここで、 m は臨界電流密度 J_c 分布の形を与えるパラメータ、 J_{cm} は J_c 分布の最小の臨界電流密度、 J_0 は分布の半値幅を与えるパラメータである。すなわち、 T_{GL} 以下では、 $J > J_{cm}$ で磁束が運動できる状態になるが、低電界側では $E-J$ 特性の n 値が大きくなり、 $J = J_{cm}$ で磁束がピンに固定される臨界状態に至る。さらに温度上昇に従い、 n 値は低下し、 T_{GL} 以上では、磁束はピンに固定されないため臨界状態は存在しない。解析では、REBCO線材の厚み方向で電磁場が一様とする近似(薄板近似)を用いて、積分方程式、高速多重極法や超伝導特性を考慮可能な非線形有限要素法を組み合わせた三次元電磁場数値解析を用いて遮蔽電流磁場の計算を行った。図2に結果の一例を示す。パーコレーションモデルの方が、 n 値モデルよりも時間安定性がよくなっている。これは、ホールド後は時間経過とともに超伝導体の $E-J$ 関係に沿って、電界が低電界側にシフトし、急峻になるからである。時間安定性の評価では、 n 値モデルは過大評価する可能性がある。

(2) マルチフィラメント線材

REBCO線材は、薄膜テープ形状であるため、特に遮蔽電流が顕著に生じるが、超伝導層を細線化することで遮蔽電流磁場が抑制されることが期待される。しかし、マルチフィラメント化REBCO線材は、機械的強度や熱的安定性を確保するため、銅メッキが施され、その結果、励磁の際に結合電流がフィラメント間を流れることになる。一方、Bi2223線材は、多芯線であるため、遮蔽電流磁場はREBCO線材ほど大きくはないが、フィラメント間がブリッジしている箇所があり、結合

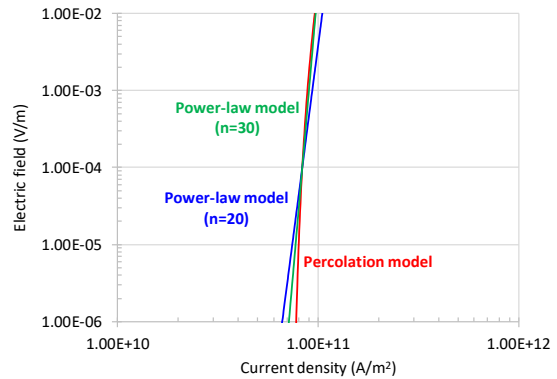


図1 n 値モデルとパーコレーションモデル

表1 解析対象のコイルの諸元

線材幅	4 mm
超伝導層	1 μm
基板	75 μm
銅層	20 μm
コイル内径	50 mm
シングルパンケーキ ターン数	50ターン
シングルパンケーキ数	6
ターン間ギャップ	25 μm
コイル間ギャップ	0.8 mm
運転温度	20 K
電流	200 A, 1.0A/s

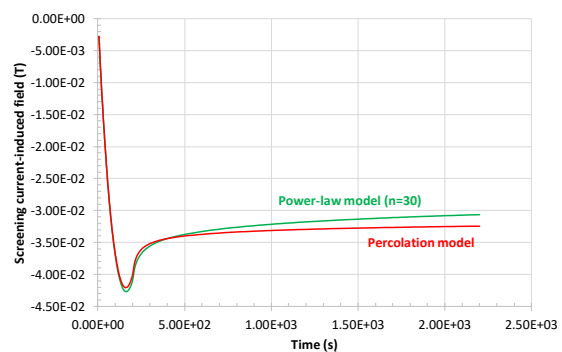


図2 遮蔽電流磁場の解析結果

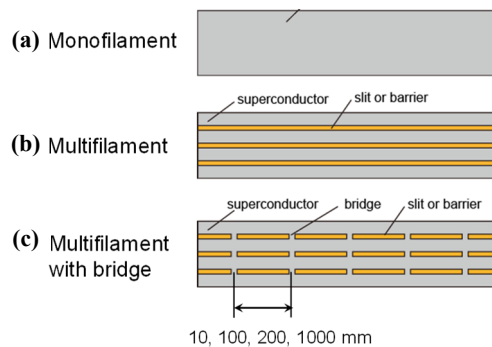


図3 マルチフィラメント線材のモデル

電流が流れることが知られている。そこで、マルチフィラメント高温超伝導材で巻線した高温超伝導コイルを対象に、電磁場解析に基づいて、巻線内電流分布や遮蔽電流磁場について評価した。

図3に今回考えるマルチフィラメント線材の解析モデルを示す。図3(a)は、フィラメント化が施されていない線材、図3(b)は、マルチフィラメント化された線材、図3(c)は、フィラメント間で所々ブリッジがある線材のモデルである。実際の線材では、REBCO線材では線材周囲に銅メッキが施されており、また、Bi2223線材ではフィラメントが多層構造をしているが、今回はフィラメント間のブリッジの影響についての初期検討として、薄膜近似を用いて計算を行った。解析対象のコイルには、幅4mm、厚さ0.1mm(超伝導層1.5μm)のREBCO線材を用いた。解析モデルコイルはパンケーキ巻きとレイヤー巻きの2種類を想定した。コイル諸元を表2に示す。電流を500Aまで0.05A/sで励磁し、その後一定として、中心磁場の時間変化を評価した。解析では、実際の巻線法を考慮して、超伝導層にのみ電流が流れるとした。n値は35一定とした。巻線の電流密度分布の展開図をFig.2に示す。この図は巻線長手方向の線材内の電流分布の一部を示している。テープ端部からスリット部に磁束侵入していく様子がわかる。

表2 解析対象のコイルの諸元

	Layer winding	Pancake winding
Conductor		
Filaments	10-filaments	10-filaments
Width	4.0 mm	4.0 mm
Thickness	0.1 mm	0.1 mm
Coil		
Inner diameter	50 mm	50 mm
Outer diameter	67 mm	67 mm
Height	95 mm	97 mm
Number of turns	60 x 20 layers	60 x 20 single pancakes
Magnetic field@500 A	6.573 T	6.568 T

(3) 電磁場・熱・機械連成解析

REBCO薄膜線材で巻線されたコイルの遮蔽電流解析技術を開発した。この解析技術によって、実験結果を解析によって再現することが可能となり、遮蔽電流磁場の定量的な評価が十分可能であることが示した。しかし、高温超伝導マグネットの研究開発の過程で、多くの実験が実施され、実際的な課題も明らかになってきた。REBCO線材は遮蔽電流の起因するテープ内の不均一な電磁力によりテープ線材とコイルの劣化に繋がる可能性もその一つである。REBCO線材は基板上に約1μmの超伝導層を結晶成長させた薄膜という脆弱な構造をしているため、超伝導線材端部のマイクロクラックが、高磁場・遮蔽電流による局所的な電磁力によって進展し、コイル性能劣化まで進む可能性が指摘されている。そこで、REBCOコイルを対象に線材が経験する巻線時の張力、冷却時の熱応力、励磁時の遮蔽電流を考慮した電磁力により、REBCO線材が受ける応力・ひずみを数値解析によって評価した。巻線間の接触は、図6のようなギャップ要素としてモデル化し、以下の特性を与える。

(a) 一体接触:接触面間が一体として挙動する。

$$E_x = E_y = E \quad (3a)$$

$$G_{xy} = \frac{E}{2(1-\nu)} \quad (3b)$$

$$v_{xy} = v_{yx} = \nu \quad (3c)$$

(b) 開口接触:接触部が変形後口開きし、自由境界になる。

$$E_x = E_y = G_{xy} = 0 \quad (4a)$$

$$v_{xy} = v_{yx} = 0 \quad (4b)$$

(c) 摩擦係数μ=0の滑り接触:接触部が変形後口開きせず、接触面方向に自由に滑る。

$$E_y = E \quad (5a)$$

$$E_x = G_{xy} = 0 \quad (5b)$$

$$v_{xy} = v_{yx} = 0 \quad (5c)$$

計算にあたっては、図7に示すようなアルゴリズムで収束するまで反復計算を行う。

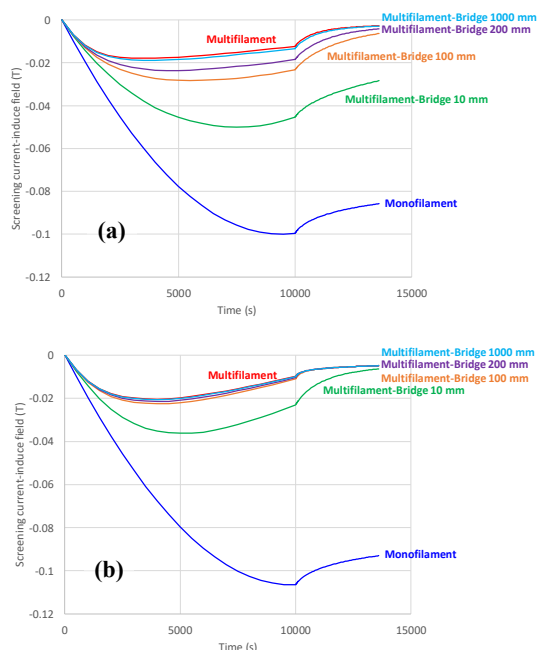
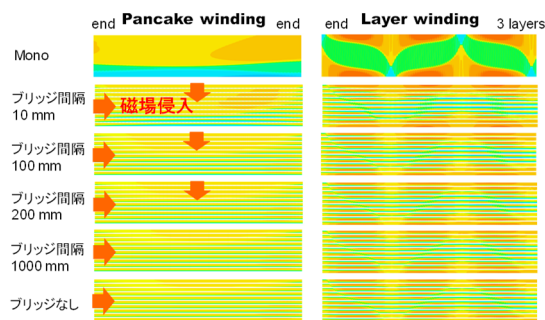


図4 遮蔽電流磁場の解析結果
(a) パンケーキ巻き、(b) レイヤー巻き



(a) パンケーキ巻き (b) レイヤー巻き

図5 線材内電流分布

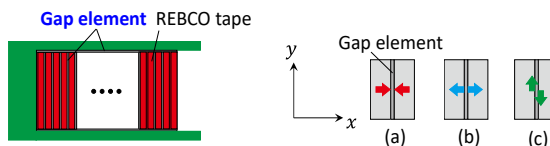


図6 巻線間の接触の簡易モデル
(a) 一体接触、(b) 開口接触、(c) 滑り接触

解析対象のコイル (図 8(a)) は、幅 4 mm、厚さ 0.1 mm (超伝導層 1.0 μm) の REBCO 線材をシングルパンケーキ巻きで巻いた内径 50 mm のコイルを 22 個積層したもので、このコイルは 245 A 通電時にコイル中心磁場は 11.5 T 発生する。図 8(b) にコイル断面における巻線内の電流分布を示す。遮蔽電流の影響により、コイル上部になるほどのパンケーキコイルで電流が巻線上端に偏っていることがわかる。この遮蔽電流は、線材内の電磁力分布の著しい不均一性を生じるため、線材が捻れたり、座屈するような電磁力が発生する。そこで、図 8(b) の電流分布に基づいて応力解析を行った。解析においては、コイルの機械的構造として、(a) REBCO 線材 epoxy 含浸 絶縁コイル (巻線間が常に接着)、(b) ポリアミド被覆 REBCO 線材 非含浸 絶縁コイル (巻線間が応力の向きによっては離れる)、(c) REBCO 線材 非含浸 無絶縁コイル (巻線間が応力の向きによっては離れる)、(d) REBCO 線材 非含浸 SUS 共巻き無絶縁コイル (巻線間が応力の向きによっては離れる) の 4 パターンの解析を実施した。解析では、巻線張力 (今回は全部 1 kg) による内部応力、曲げひずみ、冷却時の熱応力、励磁時の電磁力を考慮した。図 9 に周方向 (フープ) ひずみのコイル内分布と積層コイルの一番上のコイルのフープ応力の解析結果を示す。エポキシ含浸コイル、非含浸無絶縁コイル、非含浸 SUS 共巻き無絶縁コイルはフープ応力が 100 MPa 程度に対して、絶縁被覆 REBCO 線材非含浸コイルは 160 MPa まで発生し、線材上端と下端で応力が遮蔽電流の影響で 100 MPa 程度の差がある。このように、遮蔽電流により、想定以上の局所的な応力がかかる。絶縁コイルは、線材を包んでいるポリアミド被覆 (30 μm) が冷却の際に縮む影響で、接着していないので隙間ができて REBCO 線材が変形するためだと考えられる。

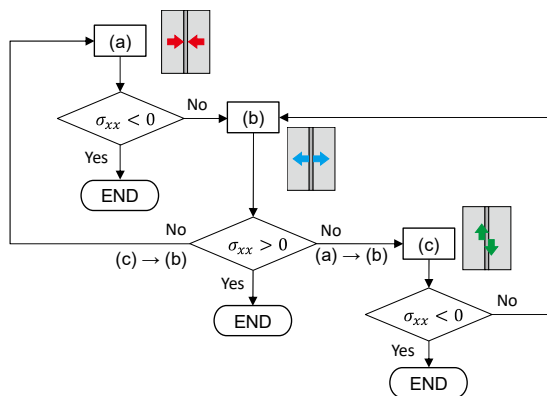
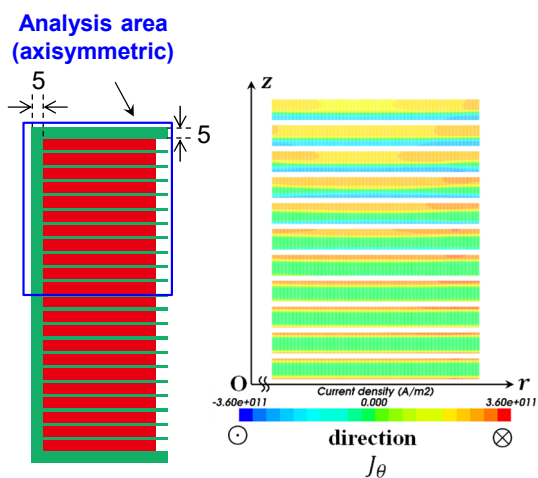


図 7 巻線間の接触の反復計算のアルゴリズム



(a) コイル断面 (b) 遮蔽電流分布
図 8 解析モデルコイル

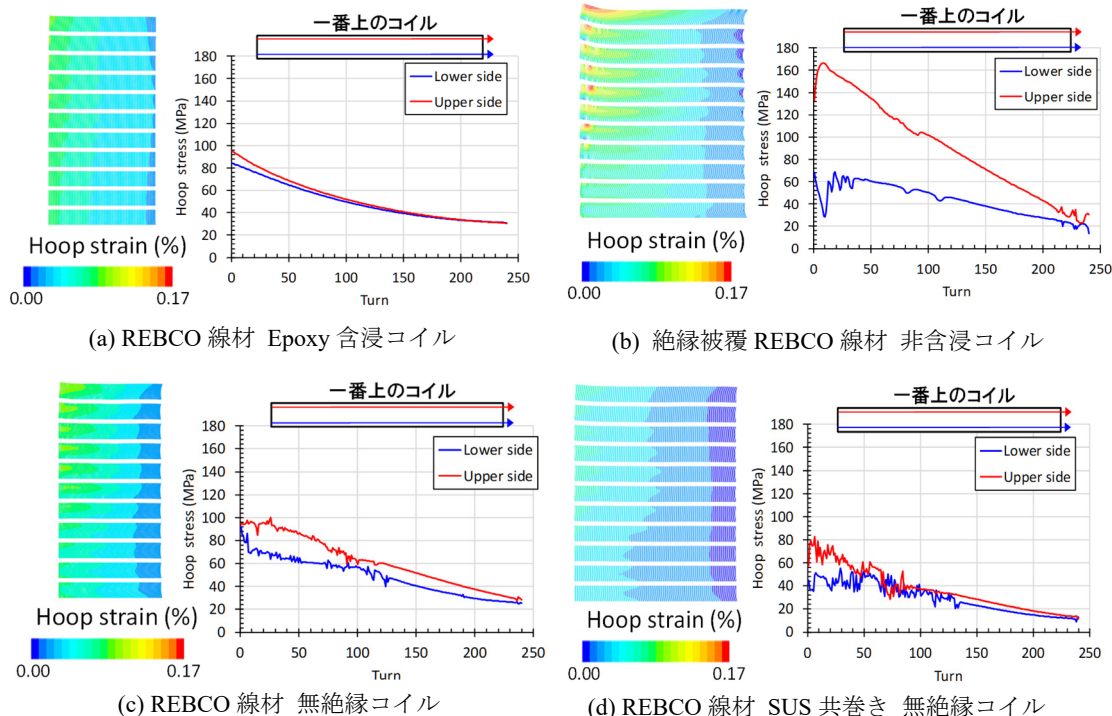


図 9 遮蔽電流による電磁応力の影響 (変形 30 倍表示)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 伊東 慶太, 植田 浩史, 野口 聡, 石山 敦士	4. 巻 54
2. 論文標題 REBCOコイルにおける遮蔽電流不整磁場の抑制効果解析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 低温工学	6. 最初と最後の頁 19-126
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2221/jcsj.54.119	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 T. Koizumi, E. Morikawa, SB. Kim, H. Ueda	4. 巻 1054
2. 論文標題 Numerical Simulation on Coupling Current for Multifilamentary HTS Wire	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 12039
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1054/1/012039	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 S. Noguchi, S. Hahn, H. Ueda, SB. Kim, A. Ishiyama	4. 巻 54
2. 論文標題 An Extended Thin Approximation Method to Simulate Screening Current Induced in REBCO Coils	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 7201904
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2017.2752083	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 S. Noguchi, H. Ueda, S. Hahn, A. Ishiyama, Y. Iwasa	4. 巻 32
2. 論文標題 A simple screening current-induced magnetic field estimation method for REBCO pancake coils	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Superconductor Science and Technology	6. 最初と最後の頁 45007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6668/aafe26	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 K. Nakazono, H. Ueda, A. Ishiyama, S. Noguchi, H. Miyazaki, T. Tosaka, T. Kurusu, S. Nomura, S. Urayama, H. Fukuyama	4. 巻 27
2. 論文標題 Numerical Evaluation on Irregular Field Generated by Screening Current in High-Field REBCO Coil for Whole-Body MRI	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 4701905
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2016.2645839	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計31件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 H. Ueda, Y. Awazu, K. Tokunaga, E. Morikawa, SB. Kim
2. 発表標題 Numerical evaluation on the stress and strain distributions due to screening current in REBCO coil
3. 学会等名 10th ACASC/2nd Asian-ICMC/CSSJ Joint Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 細谷 野里香, 徳永 佳祐, 盛川 瑛亮, 金 錫範, 植田 浩史
2. 発表標題 REBCOコイル励消磁時の遮蔽電流に起因する電磁力解析
3. 学会等名 令和元年度(第70回)電気・情報関連学会中国支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Ueda, K. Tokunaga, E. Morikawa, SB. Kim
2. 発表標題 Numerical evaluation on electromagnetic force and stress due to screening current in REBCO coil
3. 学会等名 26th International Conference on Magnet Technology (MT-26) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 稲垣 善太, 小曾根 裕一, 伊東 慶太, 石山 敦士, 植田 浩史, 野口 聡
2. 発表標題 REBCOコイルにおける部分的細線化による遮蔽電流磁場低減効果 : 9.4T級ヒト全身用MRIコイルを対象として
3. 学会等名 2018年度春季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Ueda, T. Koizumi, E. Morikawa, S.B. Kim, A. Ishiyama, S. Noguchi
2. 発表標題 Numerical simulation on screening and coupling current distribution in coil wound with high temperature superconducting tape
3. 学会等名 27th International Cryogenic Engineering Conference-International Cryogenic Materials Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Ito, A. Ishiyama, H. Ueda, S. Noguchi
2. 発表標題 Numerical Evaluation on Reduction Methods of Screening-current Induced Magnetic Field in REBCO Multiple Coil System for 9.4-T Whole-body MRI
3. 学会等名 Applied Superconductivity Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 徳永 佳祐, 盛川 瑛亮, 小泉 智暉, 金 錫範, 植田 浩史
2. 発表標題 REBCOコイルの遮蔽電流に起因する巻線内電磁力解析
3. 学会等名 平成30年度(第69回)電気・情報関連学会中国支部連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 稲垣 善太, 伊東 慶太, 石山 敦士, 植田 浩史, 野口 聡
2. 発表標題 ヒステリシス曲線を利用したオーバーシュート法による遮蔽電流不整磁場の低減法 -9.4T級ヒト全身用MRIコイルを対象として
3. 学会等名 2018年度秋季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 植田 浩史, 徳永 佳祐, 盛川 瑛亮, 小泉 智暉, 金 錫範
2. 発表標題 高温超電導コイルの巻線内電磁力解析
3. 学会等名 2018年度秋季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上田 聡美, 伊東 慶太, 稲垣 善太, 石山 敦士, 植田 浩史, 野口 聡
2. 発表標題 MRI用REBCOコイルシステムにおける遮蔽電流による不整磁場の低減法(その1): 細線化と電流制御併用法の効果
3. 学会等名 平成31年電気学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 緒方 隆充, 稲垣 善太, 伊東 慶太, 石山 敦士, 植田 浩史, 野口 聡
2. 発表標題 MRI用REBCOコイルシステムにおける遮蔽電流に起因する不整磁場の低減法(その2): 細線化と電流制御の併用法の最適化
3. 学会等名 平成31年電気学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石崎 比奈子, 稲垣 善太, 伊東 慶太, 石山 敦士, 植田 浩史, 野口 聡
2. 発表標題 MRI用REBCOコイルシステムにおける遮蔽電流に起因する不整磁場の低減法(その3): ヒステリシスを利用したオーバーシュート法
3. 学会等名 平成31年電気学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊東慶太, 中園浩平, 石山敦士, 植田浩史, 野口 聡, 宮崎寛史, 戸坂泰造, 野村俊自, 来栖 努, 浦山慎一, 福山秀直
2. 発表標題 9.4T級ヒト全身用MRI用コイルにおける遮蔽電流による不整磁場の解析
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 武藤優真, 中園浩平, 小曾根裕一, 石山敦士, 植田浩史
2. 発表標題 REBCO線材における細線化による遮蔽電流に起因する不整磁場の低減
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 植田 浩史, 石山 敦士, 柳澤 吉紀, 前田 秀明
2. 発表標題 銅メッキ付き多芯REBCOテープ線材で巻線された高温超電導コイルの遮蔽電流評価実験と解析
3. 学会等名 2017年度春季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 武藤 優真, 石山 敦士, 小泉 智暉, 植田 浩史, 金 錫範, 野口 聡
2. 発表標題 銅メッキ付き多芯REBCO線材における遮蔽電流による不整磁場の低減効果
3. 学会等名 2017年度春季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 伊東 慶太, 石山 敦士, 植田 浩史, 野口 聡, 宮崎 寛史, 戸坂 泰造, 野村 俊白, 来栖 努
2. 発表標題 9.4T級ヒト全身用MRI用コイルにおける遮蔽電流による不整磁場の解析・評価
3. 学会等名 2017年度春季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 植田 浩史, 武藤 優真, 小曾 根裕一, 石山 敦士
2. 発表標題 銅メッキ付き多芯REBCOテープ線材における遮蔽電流磁場の低減効果
3. 学会等名 電気学会 金属・セラミックス/超電導機器研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Ueda, A. Ishiyama, Y. Yanagisawa, H. Maeda
2. 発表標題 Diffusion process of screening current in REBCO coil wound with copper-plated multi-filamentary REBCO tape
3. 学会等名 25th International Conference on Magnet Technology (MT-25) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 A. Ishiyama, Y. Ozone, H. Ueda, T. Koizumi, S.B. Kim, S. Noguchi
2. 発表標題 Reduction effect of irregular magnetic field due to screening-current in copper-plated multifilamentary REBCO tape
3. 学会等名 25th International Conference on Magnet Technology (MT-25) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Y. Ozone, A. Ishiyama, S. Noguchi, H. Ueda
2. 発表標題 Reduction methods of screening currents in REBCO multiple coils based on transport-current control
3. 学会等名 13th biennial European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 盛川 瑛亮, 小泉 智暉, 金 錫範, 植田 浩史
2. 発表標題 銅メッキ付きマルチフィラメント化REBCO線材の電流分布解析
3. 学会等名 平成29年度(第68回)電気・情報関連学会中国支部連合大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 植田 浩史, 小泉 智暉, 盛川 瑛亮, 金 錫範
2. 発表標題 マルチフィラメント高温超電導線材で巻線された高温超電導コイルの遮蔽電流解析
3. 学会等名 2017年度秋季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Ueda, T. Koizumi, S.B. Kim, S. Noguchi, A. Ishiyama
2. 発表標題 Numerical simulation on current distribution in multifilamentary HTS tape
3. 学会等名 CHATS on Applied Superconductivity 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Koizumi, E. Morikawa, S.B. Kim, H. Ueda
2. 発表標題 Numerical Simulation on Coupling Current for Multifilamentary HTS Wire
3. 学会等名 30th International Symposium on Superconductivity (ISS2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 植田 浩史, 小泉 智暉, 盛川 瑛亮, 金 錫範
2. 発表標題 マルチフィラメント高温超電導線材で巻線された高温超電導コイルの結合電流分布解析
3. 学会等名 電気学会 金属・セラミックス/超電導機器研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 稲垣 善太, 伊東 慶太, 小曾根 裕一, 石山 敦士, 植田 浩史, 野口 聡
2. 発表標題 9.4T-MRIにおけるREBCO線材の細線化による遮蔽電流磁場への影響の解析
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小泉智暉, 植田浩史, 金錫範
2. 発表標題 REBCO超電導コイルの線材内電流分布解析
3. 学会等名 電気・情報関連学会 中国支部連合大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 H. Ueda, T. Koizumi, SB. Kim, S. Noguchi, A. Ishiyama
2. 発表標題 Electromagnetic Analysis on Screening Current Distribution in REBCO Coil
3. 学会等名 1st Asian ICMC - CSSJ 50th Anniversary Conference (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 H. Ueda, SB. Kim, S. Noguchi, A. Ishiyama, H. Miyazaki, S. Iwai, T. Tosaka, S. Nomura, T. Kurusu, S. Urayama, H. Fukuyama
2. 発表標題 Electromagnetic Analysis on Magnetic Field and Current Distribution in High Temperature Superconducting Thin Tape in Coil Winding
3. 学会等名 17th Biennial Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC 2106) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 H. Ueda
2. 発表標題 Electromagnetic Analysis on Screening-Current-Induced Magnetic Field in REBCO Coil
3. 学会等名 29th International Symposium on Superconductivity (ISS 2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----