

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 5 月 21 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04100

研究課題名(和文)高温超伝導体の応用機器設計へ向けた高性能遮蔽電流密度解析技術の実用化研究

研究課題名(英文)Development of High-Performance Shielding Current Analysis for Engineering Design of High-Temperature Superconducting Apparatus

研究代表者

神谷 淳(Kamitani, Atsushi)

山形大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：00224668

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高温超伝導体を流れる遮蔽電流密度の時間発展を評価するための高速・高精度解析技術を提唱し、さらに、同技術を用いて超伝導応用機器の設計支援ツールを開発した。特に、本研究では、階層行列法を遮蔽電流密度解析に応用することによって、数百万自由度をもつ遮蔽電流密度解析を実現した。本研究を通して、高温超伝導体の数値モデル化、高性能数値解析法という2つの観点から、遮蔽電流密度解析技術の開発と実証が行われた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

銅酸化物系の高温超伝導体は強い結晶学的異方性を示す。この事実を数値シミュレーションに反映させるためには、多層近似を仮定する必要があるが、同近似の下では、遮蔽電流密度の初期値・境界値問題は各時間ステップで大規模連立非線形方程式を解く問題に帰着する。加えて、遮蔽電流密度方程式は領域積分項を含むため、有限要素法による離散化で得られる連立非線形方程式の解法には膨大な計算コストを要する。本研究では、H-行列法に基づく遮蔽電流密度シミュレーション技法を開発した。その結果、同技術を用いれば、複雑形状をした超伝導応用機器中の高速・高精度遮蔽電流密度解析が可能となるはずである。

研究成果の概要(英文)：Numerical techniques with high speed and high accuracy have been proposed for analyzing the time evolution of a shielding current density in High-Temperature Superconductors (HTSs). In addition, on the basis of the proposed techniques, a numerical code has been developed for engineering design of HTS applications. In particular, by implementing the hierarchical-matrix method to the code, a shielding current analysis can be realized with millions of degree of freedom. Throughout the present study, numerical techniques of the shielding current analysis have been developed and demonstrated from the standpoint of both mathematical modeling of HTSs and high-performance of numerical methods.

研究分野：シミュレーション科学, 超伝導工学

キーワード：高温超伝導体 遮蔽電流密度 有限要素法 高速多重極法 H-行列法 Krylov空間法 前処理技術 高性能計算

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

高温超伝導体は小型冷凍機や液体窒素を用いて容易かつ安価に超伝導状態に保ち得るため、マグネット、電力貯蔵、低損失送電、磁気遮蔽、磁気浮上システム、医療機器、超伝導フィルタ等の種々の工学分野での応用が期待されている。しかしながら、超伝導応用機器を設計・開発するには、超伝導体中を流れる遮蔽電流密度や超伝導体周辺電磁界の解析が必要不可欠である。

電流ベクトル・ポテンシャル法による定式化した後、有限要素法(FEM)で離散化すると、遮蔽電流密度方程式を陰解法で解くのに要する演算量は $O(n^3)$ となる。ここで、 n はFEMの全節点数を示す。この膨大な演算量は、遮蔽電流密度方程式がGreen関数を積分核とする領域積分項を含むことに起因する。

上記難点を解決するため、筆者等は時間刻み自動制御型Runge-Kutta法を適用した。その結果、演算量を $O(n^2)$ に減少させ、遮蔽電流密度解析を高速化することに成功した。しかしながら、同法でさえ、節点数が数万を超えると、CPU時間が数万秒以上になると予想される。この結果は、数百万以上の節点を用いた超伝導応用機器中の遮蔽電流密度解析が現実的でないことを示唆する。

上記の学術的背景から、研究開始当初において、遮蔽電流密度解析に要する演算量を $O(n)$ または $O(n \log n)$ 程度にまで低減できるか否かという問題が本研究課題の核心をなしていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は高温超伝導体中の遮蔽電流密度の時間発展を評価するための高速・高精度解析技術を開発し、同技術を用いて超伝導応用機器の設計支援ツールを製作することである。本研究で開発される電磁界解析技術は数理モデルと数値解析法の2種類に大別できる。

【数理モデル】超伝導は量子効果すなわち微視的現象が巨視的に発現したものである。しかしながら、高温超伝導応用機器中を流れる遮蔽電流密度の時間発展を数値的に解析するためには、超伝導状態を記述するための巨視場に関するモデル($J-E$ 構成方程式)が必要不可欠となる。このモデルとして、Beanモデル、磁束フロー・クリープ・モデル、巾乗モデルなどが提唱されており、前者2つは超伝導体の磁気浮上力解析に応用され成功をおさめている。

【数値解析法】銅酸化物系の高温超伝導体は極めて強い結晶学的異方性を示す。即ち、結晶学的 c 軸方向には遮蔽電流密度が殆ど流れない。この実験結果を数値シミュレーションに反映させるためには、多薄層近似を仮定する必要がある。しかしながら、同近似の下では、遮蔽電流密度の初期値・境界値問題は各時間ステップで大規模連立非線形方程式を解く問題に帰着する。それ故、遮蔽電流密度を高速かつ高精度に解析するためには、 H -行列法や高速多重極法による大規模連立非線形方程式の数値解法、行列要素の高速計算法、高精度特異積分法の開発が不可欠である。

上述したように、高温超伝導体中の遮蔽電流密度シミュレーションには、磁束フロー・クリープ・モデルやBeanモデルが $J-E$ 構成方程式として採用されてきた。これに対して、本研究では、 $J-E$ 構成方程式に巾乗モデル等の実験式を採用して、遮蔽電流密度の空間分布の時間発展を数値的に計算する。この点で、本研究は従来手法と比較して現象を忠実に反映しているといえる。即ち、本研究を特色づける第1の学術的独自性と創造性は、巨視場を記述する $J-E$ 構成方程式を満足する遮蔽電流密度の時間変化を計算することにある。

良く知られているように、電流ベクトル・ポテンシャル法による定式化を用いると、遮蔽電流密度の支配方程式はGreen関数を積分核とする領域積分項を含む。それ故、FEMによる離散化で得られる連立非線形方程式の解法には膨大なCPU時間を要する。本研究では、高速多重極法や H -行列法を用いて大規模連立非線形方程式を解くため、数値シミュレーションに要する演算量は $O(n)$ または $O(n \log n)$ になり、劇的な高速化が見込まれる。即ち、本研究を特色づける第2の学術的独自性と創造性は、高速多重極法や H -行列法に基づく遮蔽電流密度シミュレーション技法を開発することである。これが実現すれば、演算量を激減できるため、複雑形状をした超伝導応用機器中の遮蔽電流密度を高速・高精度に評価することが可能となる。

3. 研究の方法

本研究では、高温超伝導体中の遮蔽電流密度の時間発展を解析する高速・高精度手法を考案し、同手法を用いて超伝導応用機器を解析する。具体的には、研究期間内に達成する目標として、「方法論開発フェーズ」、「高性能化フェーズ」、工学的実証フェーズ」という3つ段階を設定した。

「方法論開発フェーズ」では、幾何学的モデル化と物理的モデル化を行うことにより、混合状態下の超伝導体を記述する数理モデルを構築する。「高性能化フェーズ」では、高速多重極法や H -行列法を用いて、遮蔽電流密度の支配方程式の初期値・境界値問題を解くための数値シミュレーション・コードを開発する。その際、行列要素の計算と大規模連立非線形方程式の解法がCPU時間の大部分を占める。それ故、本研究では、PCクラスタやGPGPUによる並列分散処理を用いて要素計算と大規模連立非線形方程式の解法を高速処理する。「工学的実証フェーズ」では、まず、単体超伝導板の遮蔽電流密度解析を経て、最終段階では、超伝導応用機器中の遮蔽電流密度

の時間変化を定量的に評価する。具体的には、高温超伝導リニアカタパルトを用いた超高速ペレット射出装置の加速性能や超伝導磁気浮上システムにおける動的電磁力を定量的に評価する。

4. 研究成果

(1) 陰的 PDE 法と RK-ODE 法の性能評価

前述したように、電流ベクトル・ポテンシャル法による定式化した後、FEM で離散化すると、遮蔽電流密度方程式を陰解法で解くのに要する演算量は $O(n^3)$ となる。この手法を陰的 PDE 法と呼ぶ。陰的 PDE 法の演算量を低減するため、筆者等は時間刻み自動制御型 Runge-Kutta 法を適用した。この手法を RK-ODE 法と呼ぶ。しかしながら、RK-ODE 法でさえ、節点数が数万を超えると、CPU 時間が数万秒以上になると予想される。

本研究では、陰的 PDE 法を高速化するための数値解析技術を開発し、RK-ODE 法の性能をリアリスティック・シミュレーションで評価した。その結果、次の 2 つの成果が得られた。

- ・ 陰的 PDE 法では、各時間ステップに於いて Newton 法の各反復で密係数行列をもつ連立 1 次方程式が現れる。同方程式を Krylov 空間法で高速に解くために、 H -行列に基づく可変的前処理法を開発し、同可変的前処理により約 3.5 倍の高速化率が得られることが判明した。
- ・ 高温超伝導薄膜の臨界電流密度を非接触で測定するための手法として、永久磁石法と誘導法が知られている。本研究では、RK-ODE 法を両法の数値シミュレーションに適用することにより、RK-ODE 法の有効性を実証した。

(2) 変数低減法に対する加速技術の開発

遮蔽電流密度の初期値・境界値問題を時間に関して離散化すると、各時間ステップにおいて非線形境界値問題が得られる。しかしながら、HTS 薄膜がクラックを含む場合、非線形境界値問題に Newton 法で解くと、多大な計算時間を要する。これは、線形方程式ソルバーの GMRES の収束特性が著しく劣化するためである。この問題を解決するため、著者らは変数低減法 (VRM) を開発し、遮蔽電流密度解析コードに VRM を実装した。その結果、クラックを含む HTS 薄膜中の遮蔽電流密度解析に VRM が極めて有効であることが判明した。

本研究では VRM の加速法を提案し、その性能を評価した。 H -行列演算と H -行列可変的前処理という 2 種類の加速技術だけでなく、両技術の併用法をクラック付き HTS 薄膜の遮蔽電流密度解析に応用し、その加速性能を調べた。その結果、3 種類の加速技術の中で H -行列演算のみを実装した数値コードが最も優れた加速性能を示した。この結果は、併用法が H -行列演算に優る加速性能を示すためには、行列ベクトル積の加速率に上限が存在しなければならないことに起因している。しかしながら、 H -行列演算による行列ベクトル積は高速すぎるため、加速率は容易にその上限を上回ってしまうのである。これが、 H -行列演算のみを実装した数値コードが最高速となる理由である。

(3) 超伝導リニア加速システムにおける電磁石電流の最適化

超伝導リニア加速 (SLA) システムでは、水素ペレットを運搬する容器を加速するために、ペレット容器に HTS 膜が装着されている。電磁石による生成磁場中をペレット容器が運動する間、HTS 膜中を遮蔽電流密度が流れる。この遮蔽電流密度と印加磁場の相互作用により、ペレット容器は加速される。因みに、ペレット容器は永久磁石によって浮上しているため、HTS 膜の垂直方向にのみ運動する。簡単のため、SLA システムは軸対称であり、電磁石は複数のフィラメントから構成されると仮定する。

本研究では、遺伝的アルゴリズムを用いて、SLA システムの加速性能を最大化するように電磁石中の電流分布を最適化した。その際、最適化法として、On/Off 法と NGnet 法を採用した。その結果、殆ど同じ加速性能を示す準最適な電流分布 (パレート最適解) は複数個存在するが、それらの電流分布は全く異なることが判明した (Fig.1 参照)。また、準最適な加速性能を達成するには、必ずしも全フィラメントに通電する必要がない。さらに、電流分布を最適化すれば、一様な電流分布の場合と比べて加速性能が約 2.8 倍まで向上した (Fig.2 参照)。

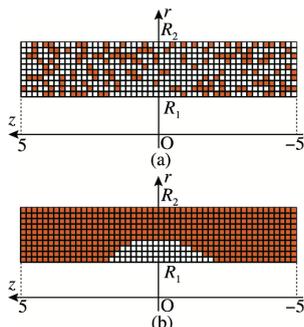


Fig. 1. 電磁石中の最適化電流分布。
(a) On/Off 法, (b) NGnet 法。

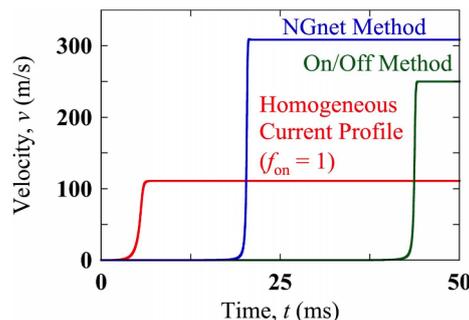


Fig. 2. 最適化電流分布を電磁石に流した場合のペレット速度の時間変化。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Takayama Teruo, Yamaguchi Takazumi, Saitoh Ayumu, Kamitani Atsushi	4. 巻 31
2. 論文標題 Improvement of Superconducting Linear Acceleration System for Pellet Injection: Optimization of Current Profile	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2021.3064795	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 KAMITANI Atsushi, TAKAYAMA Teruo, SAITOH Ayumu, NAKAMURA Hiroaki	4. 巻 16
2. 論文標題 Acceleration Techniques for Linear-System Solver in Shielding Current Analysis of Cracked HTS Film	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2405005 ~ 2405005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.16.2405005	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 TAKAYAMA Teruo, YAMAGUCHI Takazumi, SAITOH Ayumu, KAMITANI Atsushi, NAKAMURA Hiroaki	4. 巻 16
2. 論文標題 Multi-Objective Optimization of Superconducting Linear Acceleration System for Pellet Injection by Using Finite Element Method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2401025 ~ 2401025
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.16.2401025	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 Takayama Teruo, Yamaguchi Takazumi, Saitoh Ayumu, Kamitani Atsushi	4. 巻 30
2. 論文標題 Numerical Investigations on Enhanced-Performance Superconducting Linear Acceleration System for Pellet Injection	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2020.2979401	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 YAMAGUCHI Takazumi、TAKAYAMA Teruou、KAMITANI Atsushi、OHTANI Hiroaki	4. 巻 15
2. 論文標題 Current Distribution Optimization in Electromagnet: Application to Superconducting Linear Acceleration System	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2405050 ~ 2405050
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.15.2405050	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 Takayama Teruou、Yamaguchi Takazumi、Saitoh Ayumu、Kamitani Atsushi	4. 巻 64
2. 論文標題 FEM-simulation of superconducting linear acceleration system for pellet injection	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics	6. 最初と最後の頁 1469 ~ 1475
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3233/JAE-209467	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 Yamaguchi Takazumi、Ohtani Hiroaki、Takayama Teruou、Kamitani Atsushi	4. 巻 7
2. 論文標題 Current Distribution Optimization by Using Genetic-Algorithm Based On-Off Method: Application to Pellet Injection System	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Simulation in Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 201 ~ 213
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.15748/jasse.7.201	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 SAITOH Ayumu、YAMAGUCHI Takazumi、KAMITANI Atsushi、NAKAMURA Hiroaki	4. 巻 15
2. 論文標題 Hybrid Method Incorporated with Meshless Approach for Electromagnetic Wave Simulation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2401026 ~ 2401026
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.15.2401026	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 Kamitani Atsushi、Takayama Teruo、Yamaguchi Takazumi、Saitoh Ayumu	4. 巻 29
2. 論文標題 Equivalent-Circuit Method for Analyzing Shielding Current Density in Axisymmetric HTS Film	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2019.2892047	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 Yamaguchi Takazumi、Takayama Teruo、Saitoh Ayumu、Kamitani Atsushi	4. 巻 55
2. 論文標題 Numerical Investigation on Superconducting Linear Acceleration System for Pellet Injection by Using Equivalent-Circuit Model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2019.2906953	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 TAKAYAMA Teruo、YAMAGUCHI Takazumi、SAITOH Ayumu、KAMITANI Atsushi、NAKAMURA Hiroaki	4. 巻 14
2. 論文標題 FEM Simulation of Axisymmetric Pellet Injection System Using HTS Linear Acceleration	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 3401077 ~ 3401077
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.14.3401077	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 A. Kamitani, T. Takayama, and A. Saitoh	4. 巻 59
2. 論文標題 High-performance linear-system solver for shielding current analysis in cracked HTS film	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED ELECTROMAGNETICS AND MECHANICS	6. 最初と最後の頁 157-163
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3233/JAE-171206	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. Takayama, A. Saitoh, and A. Kamitani	4. 巻 59
2. 論文標題 Circuit analysis of shielding current density in HTS film and its application	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED ELECTROMAGNETICS AND MECHANICS	6. 最初と最後の頁 173-179
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3233/JAE-171207	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. Takayama, A. Saitoh, and A. Kamitani	4. 巻 28
2. 論文標題 Shielding Current Analysis in High-Temperature Superconducting Film and Its Application	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY	6. 最初と最後の頁 3700205
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2018.2804945	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. Yamaguchi, T. Takayama, A. Saitoh, and A. Kamitani	4. 巻 4
2. 論文標題 Comparison between FEM and Equivalent-Circuit Model Simulations of Superconducting Linear Acceleration System for Pellet Injection	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Simulation in Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 209-222
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.15748/jasse.4.209	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 -

〔学会発表〕 計48件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 26件)

1. 発表者名 山口敬済, 高山彰優, 佐竹真介, 大谷寛明, 柳長門, 神谷淳
2. 発表標題 高温超伝導膜中の磁気遮蔽電流密度解析
3. 学会等名 【非線形問題の解法と可視化に関する研究会】2020年度第1回研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 齋藤歩, 多田野寛人, 高山彰優, 神谷淳
2. 発表標題 Global ICCG法の3次元モデル再構成問題に現れる鞍点型連立一次方程式への適用
3. 学会等名 【非線形問題の解法と可視化に関する研究会】2020年度第1回研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 神谷 淳 , 高山 彰優 , 齋藤 歩
2. 発表標題 クラックを含む高温超伝導薄膜中の遮蔽電流密度解析: 連立 1 次方程式ソルバーの加速法
3. 学会等名 第29回MAGDAコンファレンス in 大津
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 齋藤 歩 , 高山 彰優 , 神谷 淳
2. 発表標題 断層画像データから 3D モデルも再構成法の高速化: Global ICCG 法の適用
3. 学会等名 第29回MAGDAコンファレンス in 大津
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 河崎 洋志, 高山 彰優 , 齋藤 歩 , 神谷 淳
2. 発表標題 高温超伝導リニア駆動型ペレット入射法の数値シミュレーション: 多目的最適化の適用
3. 学会等名 第29回MAGDAコンファレンス in 大津
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高山彰優, 河崎洋志, 齋藤歩, 神谷淳
2. 発表標題 遺伝的アルゴリズムを用いた超伝導加速システムの数値シミュレーション
3. 学会等名 【非線形問題の解法と可視化に関する研究会】2020年度第1回研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Yamaguchi, H. Ohtani, T. Takayama, A. Kamitani
2. 発表標題 Optimization of Electromagnet Current Distribution: Application to Performance Enhancement of Superconducting Linear Acceleration System
3. 学会等名 The 29th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 KAMITANI Atsushi, TAKAYAMA Teruou, SAITOH Ayumu, NAKAMURA Hiroaki
2. 発表標題 Acceleration Techniques for Linear-System Solver in Shielding Current Analysis of Cracked HTS Film
3. 学会等名 The 29th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 TAKAYAMA Teruou, YAMAGUCHI Takazumi, SAITOH Ayumu, KAMITANI Atsushi, NAKAMURA Hiroaki
2. 発表標題 Improvement of Superconducting Linear Acceleration System for Pellet Injection: Optimization of Current Profile
3. 学会等名 The 29th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (国際学会)
4. 発表年 2020年

1 . 発表者名 A. Kamitani, T. Takayama, A. Saitoh
2 . 発表標題 High-Speed Method for Analyzing Shielding Current Density in HTS Film: Implementation of H-Matrix-Based Variable Preconditioning
3 . 学会等名 ASC2020 (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 T. Takayama, T. Yamaguchi, A. Saitoh, A. Kamitani
2 . 発表標題 Improvement of Superconducting Linear Acceleration System for Pellet Injection: Optimization of Current Profile
3 . 学会等名 ASC2020 (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Takazumi Yamaguchi, Teruo Takayama, Atsushi Kamitani, Hiroaki Ohtani
2 . 発表標題 Current Distribution Optimization of Electromagnet in Superconducting Linear Acceleration System
3 . 学会等名 The 19th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 A. Kamitani, T. Takayama, A. Saitoh
2 . 発表標題 Acceleration Performance of HMatrix-Based Variable Preconditioning for GMRES in Shielding Current Analysis
3 . 学会等名 The 19th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1. 発表者名 Teruou Takayama , Takazumi Yamaguchi , Ayumu Saitoh , Atsushi Kamitani
2. 発表標題 Numerical Simulation of Superconducting Linear Acceleration System: Improvement of Achievable Speed of Pellet Container
3. 学会等名 The 19th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 A. Kamitani, T. Takayama, A. Saitoh
2. 発表標題 Acceleration Techniques for Linear-System Solver in Shielding Current Analysis of Cracked High-Temperature Superconducting Film
3. 学会等名 COMPUMAG2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Saitoh, T. Takayama, A. Kamitani
2. 発表標題 Hybrid Method for Solving 2D Steady-State Scattering Problems of Electromagnetic Wave: Application of Collocation EFGM-BEM
3. 学会等名 COMPUMAG2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Yamaguchi, T. Takayama, H. Ohtani, A. Kamitani
2. 発表標題 Equivalent-Circuit Model for Axisymmetric High-Temperature Superconducting Film: Application to Contactless jC Measurement System and Pellet Injection System
3. 学会等名 COMPUMAG2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齋藤 歩, 高山 彰優, 神谷 淳
2. 発表標題 2次元定常電磁波散乱問題へのCollocation EFGM-BEMの適用
3. 学会等名 日本応用数理学会2019年度年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高山彰優, 山口 敬済, 齋藤 歩, 神谷 淳
2. 発表標題 超伝導リニア加速システムの数値シミュレーション: ペレット入射速度の高速化
3. 学会等名 日本応用数理学会2019年度年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山口 敬済, 高山 彰優, 神谷 淳, 大谷 寛明
2. 発表標題 軸対称高温超伝導膜内遮蔽電流密度解析: 等価回路法の適用
3. 学会等名 日本応用数理学会2019年度年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋 弘通, 高山彰優, 神谷淳
2. 発表標題 大規模高速多重極境界要素法の精度劣化の原因とその改善法
3. 学会等名 プラズマシミュレーションシンポジウム 2019 (PSS2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前田隼人, 高山彰優, 神谷淳
2. 発表標題 プラズマ加熱用電磁波の FDTD シミュレーション: 縮小モデルの妥当性
3. 学会等名 プラズマシミュレータシンポジウム 2019 (PSS2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山口 敬済, 高山 彰優, 神谷 淳, 大谷 寛明
2. 発表標題 軸対称高温超伝導膜中の遮蔽電流密度解析: 等価回路法の適用
3. 学会等名 【非線形問題の解法と可視化に関する研究会】 2019 年度第1 回研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齋藤歩, 高山彰優, 神谷淳
2. 発表標題 Collocation EFGM-BEM併用法による電磁波散乱問題の数値解法
3. 学会等名 【非線形問題の解法と可視化に関する研究会】 2019 年度第1 回研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takazumi Yamaguchi, Teruou Takayama, Atsushi Kamitani and Hiroaki Ohtani
2. 発表標題 Numerical Simulation of Superconducting Linear Acceleration System by Using Equivalent-Circuit Model: Improvement of Acceleration Performance
3. 学会等名 The 38th JSST Annual International Conference on Simulation Technology (JSST2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Teruou Takayama, Takazumi Yamaguchi, Ayumu Saitoh and Atsushi Kamitani
2 . 発表標題 Numerical Simulation of Superconducting Linear Acceleration System: Improvement of Pellet Speed
3 . 学会等名 The 38th JSST Annual International Conference on Simulation Technology (JSST2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Ayumu Saitoh, Yuji Hirabuki, Hiroto Tadano, Teruou Takayama and Atsushi Kamitani
2 . 発表標題 Volumetric 3D Reconstruction Based on Tomographic Image Data: Acceleration by Global ICCG Method
3 . 学会等名 The 38th JSST Annual International Conference on Simulation Technology (JSST2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Takayama, T. Yamaguchi, A. Saitoh, A. Kamitani
2 . 発表標題 FEM-Simulation of Superconducting Linear Acceleration System for Pellet Injection
3 . 学会等名 The 19th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (ISEM2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 A. Kamitani, T. Takayama, A. Saitoh
2 . 発表標題 H-Matrix Based Variable Preconditioning for Linear-System Solver in Shielding Current Analysis of High-Temperature Superconducting Film with Cracks
3 . 学会等名 The 19th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (ISEM2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 山口敬済, 大谷寛明, 高山彰優, 神谷淳
2. 発表標題 遺伝的アルゴリズムによる電磁石中の電流分布の最適化: 超伝導リニア加速システムへの応用
3. 学会等名 【非線形問題の解法と可視化に関する研究会】 2019 年度第2 回研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高山彰優, 山口敬済, 齋藤歩, 神谷淳
2. 発表標題 超伝導リニア加速システムの数値シミュレーション: ペレット入射速度の高速化
3. 学会等名 【非線形問題の解法と可視化に関する研究会】 2019 年度第2 回研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 神谷淳, 高山彰優, 齋藤歩
2. 発表標題 拘束条件付き連立1次方程式の高性能解法
3. 学会等名 【非線形問題の解法と可視化に関する研究会】 2018年度第1回研究会(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 齋藤歩, 高山彰優, 神谷淳
2. 発表標題 メッシュレス法を用いた電磁波伝搬シミュレーション
3. 学会等名 日本応用数理学会2018年度年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山口敬済, 高山彰優, 齋藤歩, 神谷淳
2. 発表標題 等価回路モデルによるHTS内の遮蔽電流密度解析
3. 学会等名 日本応用数理学会2018年度年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高山彰優, 山口敬済, 齋藤歩, 神谷淳
2. 発表標題 超伝導リニア駆動型ペレット入射法のFEMシミュレーション
3. 学会等名 日本応用数理学会2018年度年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ayumu Saitoh, Teruou Takayama and Atsushi Kamitani
2. 発表標題 Meshless Approach for Solving 2D Steady-State Electromagnetic Wave Scattering Problem
3. 学会等名 The 37th JSST Annual International Conference on Simulation Technology (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takazumi Yamaguchi, Teruou Takayama, Ayumu Saitoh and Atsushi Kamitani
2. 発表標題 Shielding Current Analysis in Axisymmetric High-Temperature Superconducting Film by Equivalent-Circuit Model
3. 学会等名 The 37th JSST Annual International Conference on Simulation Technology (国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 Teruou Takayama, Takazumi Yamaguchi, Ayumu Saitoh and Atsushi Kamitani
2 . 発表標題 FEM-Simulation of Pellet Injection System by High-Temperature Superconducting Linear Acceleration
3 . 学会等名 The 37th JSST Annual International Conference on Simulation Technology (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Teruou Takayama, Takazumi Yamaguchi, Ayumu Saitoh, Atsushi Kamitani
2 . 発表標題 Numerical Simulation of Pellet Injection System Using Superconducting Linear Acceleration
3 . 学会等名 2018 Applied Superconductivity Conference (ASC2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Atsushi Kamitani, Teruou Takayama, Takazumi Yamaguchi, Ayumu Saitoh
2 . 発表標題 Equivalent-Circuit Method for Analyzing Shielding Current Density in Axisymmetric HTS Film
3 . 学会等名 2018 Applied Superconductivity Conference (ASC2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 A. Saitoh, T. Takayama, A. Kamitani
2 . 発表標題 Numerical Approach for Solving 2D Steady-State Scattering Problem of Electromagnetic Wave
3 . 学会等名 The Eighteenth Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC 2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 T. Yamaguchi, T. Takayama, A. Saitoh, A. Kamitani
2 . 発表標題 Numerical Investigation on Superconducting Linear Acceleration System for Pellet Injection by Using Equivalent-Circuit Model
3 . 学会等名 The Eighteenth Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC 2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Atsushi Kamitani, Teruou Takayama, Takazumi Yamaguchi, Ayumu Saitoh
2 . 発表標題 Electromagnetic Field Computation in Axisymmetric High-Temperature Superconducting Film by EquivalentCircuit Method
3 . 学会等名 The 27th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research & The 13th Asia Pacific Plasma Theory Conference (ITC27 & APPTC2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Teruou Takayama, Takazumi Yamaguchi, Ayumu Saitoh, Atsushi Kamitani
2 . 発表標題 High-Performance FEM Simulation of Axisymmetric Pellet Injection System Using HTS Linear Acceleration
3 . 学会等名 The 27th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research & The 13th Asia Pacific Plasma Theory Conference (ITC27 & APPTC2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 A. Saitoh, T. Takayama, A. Kamitani
2 . 発表標題 Meshless Approach for Solving 2D Large-Scale Steady-State Scattering Problem of Electromagnetic Wave
3 . 学会等名 The 27th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research & The 13th Asia Pacific Plasma Theory Conference (ITC27 & APPTC2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 山口敬済, 高山彰優, 齋藤歩, 神谷淳
2. 発表標題 等価回路法による軸対称高温超伝導膜中の遮蔽電流密度解析
3. 学会等名 【非線形問題の解法と可視化に関する研究会】 2018 年度第2 回研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高山彰優, 山口敬済, 齋藤歩, 神谷淳
2. 発表標題 高温超伝導リニア駆動によるペレット入射法のFEMシミュレーション
3. 学会等名 【非線形問題の解法と可視化に関する研究会】 2018 年度第2 回研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齋藤歩, 平吹勇司, 多田野寛人, 高山彰優, 神谷淳
2. 発表標題 断層画像データから3Dポリュメトリックモデルの再構成: Global ICCG法による高速化
3. 学会等名 【非線形問題の解法と可視化に関する研究会】 2018 年度第2 回研究会
4. 発表年 2019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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------