

平成 30 年 5 月 23 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05926

研究課題名(和文)高温超伝導体の応用機器設計へ向けた先進電磁界解析技術の開発

研究課題名(英文) Development of Advanced Technology in Electromagnetic Field Analysis for Engineering Application of High-Temperature Superconductor

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) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：クラックを含む高温超伝導(HTS)膜の遮蔽電流解析に現れる線形方程式を解くための高性能法を提案した。離散化により、遮蔽電流解析は線形方程式に帰着する。しかし、クラックの存在は線形方程式ソルバーの収束特性に多大な影響を及ぼす。収束特性を改善する目的で著者は変数低減法を提案した。同法を実装すると、収束特性はクラックの影響をほぼ受けない。

他方、外部磁場中を運動するペレット容器の一部であるHTS膜中の遮蔽電流密度を解析するための数値コードを開発した。同コード中では、ペレット容器のNewton方程式が遮蔽電流密度方程式と連立して解かれる。同コードを用いて、超伝導リニア加速方式の性能が数値的に調べられた。

研究成果の概要(英文)：A high-performance method is proposed for solving a linear system in the shielding current analysis of a cracked high-temperature superconducting (HTS) film. After the discretization, the shielding current analysis reduces to a linear system at each iteration cycle of the Newton method. However, the cracks significantly affect convergence property of a linear-system solver. In order to improve its convergence property, the variable reduction method is proposed. If the method is implemented, the convergence property is hardly influenced by any cracks.

On the other hand, a numerical code is also developed for analyzing the shielding current density in an HTS film that is part of a pellet container moving in an applied magnetic field. In the code, Newton's equation of motion for the pellet container is solved together with the governing equation of the shielding current density. By using the code, the performance of the superconducting linear acceleration system is investigated.

研究分野：計算科学，超伝導工学，数値解析学

キーワード：高温超伝導体 数値シミュレーション 非線形方程式 有限要素法 ペレット入射

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、超伝導フィルター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。これに対して、筆者等は時間刻み自動制御型 Runge-Kutta 法を適用することによって、演算量を $O(n^2)$ に減少させ、数値シミュレーションを高速化することに成功した。本研究では、演算量を $O(n)$ にすることを目指して、高速多重極法を用いて大規模連立非線形方程式を解くことを提案する。従って、遮蔽電流密度方程式は劇的な高速化が見込まれるため、実機設計を前提とした大規模シミュレーションが実現可能となる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、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性能電磁界解析技術を考案し、さらに、同技術を用いて超伝導機器の設計支援ツールを開発することである。特に、本研究では高速多重極法を遮蔽電流密度解析に応用することによって、数百万個の節点をもつような超伝導応用機器中の遮蔽電流密度解析を実現することを目指す。この目的を達成するため、高速数値解析法、高温超伝導体の数値モデル化という2つの観点から、電磁界解析技術の開発と実証を行う。また、研究目的を期間内に達成するため、「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つの段階を順に遂行してゆく。

「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値モデルを構築する。「高性能化フェーズ」では、高速多重極法を用いて、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。

3. 研究の方法

本研究を推進するためには、3つの段階を

実行することになる。

先ず、第1段階では、研究代表者が高温超伝導体の電磁特性データベースを構築し、データベースに基づいた数値モデルを提案する。さらに、2次元数値シミュレーション・コードに高速多重極法を実装することにより、その高速性を実証する。その間、研究室スタッフは、並列分散処理環境を構築した後、並列分散処理技術を蓄積する。第2段階では、研究代表者および研究室スタッフは高速多重極3次元遮蔽電流密度シミュレーション・コードを共同開発し、2次元コードとの比較検討を行う。最終段階では、遮蔽電流密度と生成磁界の時間発展を再現するアニメーション化プログラムを開発する。同時に、高速解析を目的として、数値シミュレーション・コードを並列分散処理環境に実装する。

4. 研究成果

(1) H -行列法による高速遮蔽電流密度解析

薄板近似の下では、遮蔽電流密度の時間発展は遮蔽電流密度方程式に支配され、同方程式は Green 関数を積分核とする積分型演算子を含む。時間に関して離散化すると、遮蔽電流密度方程式の初期値・境界値問題は各時間ステップにおける非線形境界値問題に帰着する。さらに、同問題に Newton 法を適用すると、各反復では線形境界値問題が得られる。即ち、各時間ステップでは、Newton 法の反復ごとに連立1次方程式の解法が必要となる。

積分演算子に対応する FEM 行列 W は密行列になる。これに対して、Newton 法の各反復で解くべき連立1次方程式の係数行列から W の寄与を取り除くと、残りの行列は疎行列になる。このことは、行列 W とベクトルの高速積を実行することによって、GMRES の高速化を実現できることを暗示している。この理由から、本研究では、 H -行列法を FEM 行列 W に適用した後、その結果として得られる近似行列を行列ベクトル積に用いた。

H -行列法が遮蔽電流密度解析コードの性能に及ぼす影響を調べた。その結果、 H -行列法が HTS 薄膜内における大規模遮蔽電流密度解析に有効であることが判明した。

(2) 変数低減法の開発

HTS 薄膜の特性はクラックにより著しく劣化するため、非破壊クラック検出法は大型 HTS 薄膜の製造過程において不可欠である。この理由から、HTS 薄膜内の非破壊クラック検出法が望まれてきた。服部等は HTS 薄膜の臨界電流密度を測定するための走査型永久磁石法(SPM)を開発し、さらに、同法が HTS 薄膜内のクラック検出に応用できることも示唆した。しかし、クラック検出法としての SPM の性能は十分に調べられた訳ではない。

他方、クラック検出シミュレーションには遮蔽電流密度の計算が必要不可欠であり、それ故、遮蔽電流密度の時間発展を解析する数値計算法がこれまで電流ベクトル・ポテンシ

ヤル法を用いて開発されてきた。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、同問題は各時間ステップにおける非線形境界値問題に帰着する。しかしながら、Newton 法を用いた場合でも、この非線形問題の解法には膨大な計算時間を要する。これは Newton 法の各反復において拘束条件付き連立 1 次方程式を解くことに起因する。上記手法を仮想電圧法と呼ぶ。著者等は連立 1 次方程式の解法に GMRES を適用すれば、各時間ステップにおける仮想電圧法の計算量が $O(n^2)$ 程度まで低減できることを示した。しかしながら、数百万自由度をもつ大規模問題に仮想電圧法を適用するには、さらなる高速化が必要である。

本研究では、クラック付き HTS 薄膜中での遮蔽電流密度解析を加速するため、QR 分解による変数低減法という手法を提案した。さらに、変数低減法の性能を数値的に評価し、同法の応用として、HTS 薄膜内の複数クラックの検出可能性を数値的に検討した。

(3) ペレット入射シミュレーション

ペレット入射は磁場閉じ込め核融合炉への有効な燃料供給法である。近年、リニアモーター駆動によるペレット射出方式が提唱されている。同方式では、真空チューブ中に敷設した永久磁石のレール上で HTS 薄膜を用いた超小型磁気浮上列車をリニア電磁加速している。今後、同方式を超伝導リニア加速 (SLA) 方式と呼ぶ。SLA 方式の加速性能は HTS 薄膜中を流れる遮蔽電流密度解析を行うことによって評価できる。本研究では、遮蔽電流密度解析の応用として SLA 方式の実現可能性を数値的に検証した。

遮蔽電流密度の時間変化とペレット容器の運動はそれぞれ遮蔽電流密度方程式と Newton 方程式によって記述される。本研究では、遮蔽電流密度方程式を離散化するために、有限要素法(FEM)と等価回路法(ECM)を適用した。その結果、何れの離散化法を用いた場合も、連立常微分方程式が得られた。この連立常微分方程式の初期値問題は Runge-Kutta 法によって容易に解くことができる。

FEM/ECM を用いてペレット容器の速度変化を調べることにより、SLA 方式の加速性能を調べた。その結果、SLA 方式で単一の電磁石を用いた場合でも、ペレット容器は 150 m/s まで加速されることが判明した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 18 件)

- 1) A. Kamitani, T. Takayama, A. Saitoh, and S. Ikuno: "Convergence-property improvement of GMRES in shielding current analysis of cracked high-temperature superconducting film," J.

Adv. Simul. Sci. Eng., Vol. 4 (2018) 117-131, 査読有。

DOI: 10.15748/jasse.4.117

- 2) T. Takayama, A. Saitoh, and A. Kamitani: "Shielding Current Analysis in High-Temperature Superconducting Film and Its Application," IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 28 (2018) Art. No. 3700205, 査読有。
DOI: 10.1109/TASC.2018.2804945.
- 3) 高山彰優, 山口敬済, 神谷淳: 「高温超伝導リニア加速によるペレット射出方式の数値シミュレーション」, 計算数理工学論文集, Vol. 17 (2017) 31-36, 査読有。
<http://gpsun1.gee.kyoto-u.ac.jp/JASCOME/denshi-journal/17/JA176.pdf>
- 4) A. Saitoh, T. Takayama, and A. Kamitani: "Combination Approach of Domain-Type and Boundary-Type Meshless Methods for Solving Hybrid Boundary-Value Problem of Homogeneous and Inhomogeneous Elliptic PDEs," IEEE Trans. Magn., Vol. 53 (2017) Art. No. 7202504, 査読有。
DOI: 10.1109/TMAG.2017.2657635
- 5) A. Kamitani, T. Takayama, and A. Saitoh: "Numerical Simulation of Shielding Current Density in HTS Film by Using Acceleration Technique with H-Matrix Method," IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 27 (2017) Art. No. 8001005, 査読有。
DOI: 10.1109/TASC.2017.2652068
- 6) T. Takayama, A. Saitoh, and A. Kamitani: "Numerical Simulation of Contactless Method for Measuring j_c in Multiple-Layered Superconducting Film With Cracks," IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 27 (2017) Art. No. 9000805, 査読有。
DOI: 10.1109/TASC.2016.2643506
- 7) T. Takayama, A. Kamitani, A. Saitoh: "High-speed method for analyzing shielding current density in HTS with cracks: implementation of H-matrix method to GMRES," J. Adv. Simul. Sci. Eng., Vol. 3 (2016) 173-187, 査読有。
DOI: 10.15748/jasse.3.173
- 8) T. Itoh, A. Saitoh, S. Ikuno, and A. Kamitani: "Numerical Investigation of Preconditioning for Iterative Methods in Linear Systems Obtained by Extended Element-Free Galerkin Method," J. Adv. Simul. Sci. Eng., Vol. 3 (2016) 188-205, 査読有。
DOI: 10.15748/jasse.3.188
- 9) A. Kamitani, T. Takayama, A. Saitoh: "High-Speed Shielding Current Analysis in High-Temperature Superconducting Film with Cracks," IEEE Trans.

- Magn., Vol. 52 (2016) Art. No. 7202404, 査読有.
DOI: 10.1109/TMAG.2015.2487343
- 10) T. Takayama and A. Kamitani: "Acceleration for shielding current analysis in superconducting film containing cracks," Int. J. Appl. Electromagnetics Mech., Vol. 52 (2016) 555-561, 査読有.
DOI: 10.3233/JAE-162031
- 11) A. Kamitani, T. Takayama, A. Saitoh and H. Nakamura: "Speedup of Shielding Current Analysis in High-Temperature Superconducting Film: Implementation of H-Matrix Method," Plasma Fusion Res., Vol. 11 (2016) Art. No. 2405041, 査読有.
DOI: 10.1585/pfr.11.2405041
- 12) T. Takayama, A. Saitoh, A. Kamitani and H. Nakamura: "Simulation of Contactless Crack Detection in HTS Films: Application of H-Matrix Method to Fast Matrix-Vector Multiplication," Plasma Fusion Res., Vol. 11 (2016) Art. No. 2401043, 査読有.
DOI: 10.1585/pfr.11.2401043
- 13) A. Saitoh, T. Takayama, A. Kamitani and H. Nakamura: "Performance Improvement of Extended Boundary Node Method for Solving Elliptic Boundary-Value Problems," Plasma Fusion Res., Vol. 11 (2016) Art. No. 2401062, 査読有.
DOI: 10.1585/pfr.11.2401062
- 14) T. Takayama, A. Kamitani, and H. Nakamura: "Numerical Investigation on Contactless Methods for Identifying Defects in High-Temperature Superconducting Film," Plasma Fusion Res., Vol. 10 (2015) Art. No. 3401059, 査読有.
DOI: 10.1585/pfr.10.3401059
- 15) A. Kamitani, T. Takayama, A. Saitoh and H. Nakamura: "High-Speed Algorithm for Shielding Current Analysis in HTS Film with Cracks," Plasma Fusion Res., Vol. 10 (2015) Art. No. 3405023, 査読有.
DOI: 10.1585/pfr.10.3405023
- 16) T. Takayama, S. Ikuno, and A. Kamitani: "Numerical Simulation of Inductive Method for Measuring j_c and Detecting Crack in an HTS Film," IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 25 (2015) Art. No. 9000104, 査読有.
DOI: 10.1109/TASC.2014.2361060
- 17) A. Kamitani, T. Takayama and S. Ikuno: "Numerical Simulation of Permanent Magnet Method: Applicability to Crack Detection in High-Temperature Superconducting Film," IEEE Trans. Magn., Vol. 51 (2015) Art. No. 7000504, 査読有.
DOI: 10.1109/TMAG.2014.2360934
- 18) A. Saitoh, T. Itoh, N. Matsui and A. Kamitani: "Performance Improvement of Extended Boundary Node Method," IEEE Trans. Magn., Vol. 51 (2015) Art. No. 7204704, 査読有.
DOI: 10.1109/TMAG.2014.2347336
- [学会発表](計 43件)
- 1) 高山彰優, 山口敬済, 神谷淳, 本島徹, 柳長門: 「高温超伝導リニア加速によるペレット射出方式の数値シミュレーション」, 【非線形問題の解法に関する研究会】第2回非線形・可視化部門研究会, 2018年.
- 2) 山口敬済, 高山彰優, 神谷淳: 「高温超伝導リニアカタパルトを用いた超高速ペレット入射シミュレーション: 等価回路モデルと FEM モデル」, プラズマシミュレートシンポジウム 2017, 2017年.
- 3) 高山彰優, 山口敬済, 神谷淳: 「高温超伝導リニア加速によるペレット射出方式の数値シミュレーション」, JASCOME Symposium 2017, 2017年.
- 4) A. Saitoh, T. Takayama, and A. Kamitani: "Numerical Approach Using Only Meshless Method for Solving Steady-State Scattering Problems of Electromagnetic Wave", The 21st International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (Compumag 2017), 2017年.
- 5) T. Yamaguchi, T. Takayama, A. Saitoh and A. Kamitani: "Numerical Simulation of Pellet Injection with High-Temperature Superconducting Film by Equivalent Circuit Model," The 36th JSST Annual International Conference on Simulation Technology (JSST 2017), 2017年.
- 6) T. Takayama, A. Saitoh and A. Kamitani: "Numerical Simulation of Pellet Injection Method by Acceleration of HTS Film," The 36th JSST Annual International Conference on Simulation Technology (JSST 2017), 2017年.
- 7) A. Kamitani, Takazumi Yamaguchi, T. Takayama, G. Motojima, and N. Yanagi: "Comparison between FEM and Equivalent-Circuit Model Simulations of Superconducting Linear Acceleration System for Pellet Injection," Joint meeting of 26th International Toki Conference and 11th Asia Plasma & Fusion Association Conference, 2017年.
- 8) T. Takayama, Takazumi Yamaguchi, A. Kamitani, G. Motojima, and N. Yanagi:

- “Numerical Investigation on Pellet Acceleration System by Using High-Temperature Superconducting Film,” Joint meeting of 26th International Toki Conference and 11th Asia Plasma & Fusion Association Conference, 2017 年 .
- 9) T. Takayama, A. Saitoh, and A. Kamitani: “Shielding Current Analysis in High-Temperature Superconducting Film and Its Application,” The 25th International Conference on Magnet Technology (MT25), 2017 年 .
 - 10) T. Takayama, A. Saitoh, and A. Kamitani: “Time-Domain FEM Analysis of Shielding Current Density in Multiple-Layered HTS Film and Its Application,” The 18th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (ISEM 2017), 2017 年 .
 - 11) A. Kamitani, T. Takayama, and A. Saitoh: “High-Performance Linear-System Solver for Shielding Current Analysis in Cracked HTS Film,” The 18th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (ISEM 2017), 2017 年 .
 - 12) 神谷淳, 高山彰優: 「拘束条件付き連立一次方程式の高性能ソルバー」, 【非線形問題の解法に関する研究会】第 2 回非線形・可視化部門研究会, 2017 年 .
 - 13) 高山彰優, 齋藤歩, 神谷淳: 「多層型 HTS 薄膜の遮蔽電流密度解析: 内部クラックの検出可能性」, 【非線形問題の解法に関する研究会】第 2 回非線形・可視化部門研究会, 2017 年 .
 - 14) A. Saitoh, T. Takayama and A. Kamitani: “Meshless Approach for Solving Internal and External Boundary-Value Problem,” 2017 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM 2017), 2017 年 .
 - 15) T. Takayama, A. Saitoh and A. Kamitani: “Shielding Current Analysis in Multiple-Layered Superconducting Film with Cracks: Application to Contactless Method for Measuring j_c ,” 2017 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM 2017), 2017 年 .
 - 16) A. Kamitani, T. Takayama, A. Saitoh: “Acceleration Methods for Shielding Current Analysis in Cracked Superconducting Film,” 2017 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM 2017), 2017 年 .
 - 17) T. Takayama, A. Saitoh, A. Kamitani: “Numerical Investigation on Detection of Internal Crack in HTS Film by Using Contactless Method for Measuring j_c ,” The 29th International Symposium on Superconductivity, 2016 年 .
 - 18) A. Kamitani, T. Takayama, A. Saitoh: “High-Speed Shielding Current Analysis in Cracked HTS Film: Implementation of H-Matrix Method and Variable Reduction Method,” The 29th International Symposium on Superconductivity, 2016 年 .
 - 19) T. Takayama, A. Saitoh, A. Kamitani: “Shielding Current Analysis in Multiple-Layered Superconducting Film with Cracks,” The 1st Japan-Thailand Workshop on Numerical and Experimental Approaches to Nonlinear Problems, 2016 年 .
 - 20) A. Saitoh, T. Takayama, A. Kamitani: “Numerical Approach by Using Only Meshless Method to Solve Both External and Internal Problems,” The 1st Japan-Thailand Workshop on Numerical and Experimental Approaches to Nonlinear Problems, 2016 年 .
 - 21) A. Kamitani, T. Takayama, A. Saitoh: “Speedup Methods for Shielding Current Analysis in Cracked Superconducting Film,” The 1st Japan-Thailand Workshop on Numerical and Experimental Approaches to Nonlinear Problems, 2016 年 .
 - 22) 神谷淳, 高山彰優, 齋藤歩: 「拘束条件付き連立 1 次方程式の高性能解法」, MAGDA2016 in Kiryu, 2016 年 .
 - 23) A. Kamitani, T. Takayama, A. Saitoh, and S. Ikuno: “Convergence-Property Improvement of GMRES in Shielding Current Analysis of Cracked Superconducting Film,” The 17th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC2016), 2016 年 .
 - 24) A. Saitoh, T. Takayama and A. Kamitani: “Combination Approach of Domain-Type and Boundary-Type Meshless Methods for Solving Hybrid Boundary-Value Problem of Homogeneous and Inhomogeneous Elliptic PDEs,” The 17th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC2016), 2016 年 .
 - 25) A. Saitoh, T. Takayama and A. Kamitani: “Numerical Approach Using Meshless Method for Solving Interior and Exterior Boundary-Value Problems,” The 35th JSST Annual Conference International Conference on Simulation Technology, 2016 年 .
 - 26) T. Takayama, A. Saitoh and A. Kamitani: “High-Speed Analysis of Shielding Current Density in HTS Film with

- Cracks,” The 35th JSST Annual Conference International Conference on Simulation Technology, 2016年.
- 27) 高山彰優, 齋藤歩, 神谷淳: 「HTS 薄膜内遮蔽電流密度解析の高速化 II: QR 分解と H 行列法の実装」, 日本応用数学会 2016 年度年会, 2016 年.
- 28) T. Takayama, A. Saitoh, and A. Kamitani: “Numerical simulation of contactless method for measuring j_c in multiple-layered superconducting film with cracks,” Applied Superconductivity Conference (ASC2016) 2016 年.
- 29) A. Kamitani, T. Takayama, and A. Saitoh: “Numerical Simulation of Shielding Current Density in HTS Film by Using Acceleration Technique with H-Matrix Method,” Applied Superconductivity Conference (ASC2016), 2016 年.
- 30) 高山彰優, 齋藤歩, 神谷淳: 「クラックを含む HTS 薄膜内を流れる遮蔽電流密度解析の高速化」, 【非線形問題の解法に関する研究会】第 1 回非線形・可視化部門研究会, 2016 年.
- 31) 神谷淳, 高山彰優: 「拘束条件付き連立 1 次方程式の高性能解法」, 【非線形問題の解法に関する研究会】第 1 回非線形・可視化部門研究会, 2016 年.
- 32) T. Takayama, A. Saitoh, A. Kamitani and H. Nakamura: “Large-scale simulation of contactless crack detection in HTS films: application of H-matrix method to fast matrix-vector multiplication,” The 25th International TOKI Conference (ITC-25), 2015 年.
- 33) A. Kamitani, T. Takayama, A. Saitoh and H. Nakamura: “Speedup of shielding current analysis in high-temperature superconducting film: implementation of H-matrix method,” The 25th International TOKI Conference (ITC-25), 2015 年.
- 34) T. Takayama, A. Kamitani: “Acceleration Technique for Shielding Current Analysis in Superconducting Film with Cracks,” 2015 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2015), 2015 年.
- 35) 神谷淳: 「高温超伝導薄膜内における数値電磁界解析」, 第 24 回 MAGDA コンファレンス in Tohoku, 2015 年.
- 36) T. Takayama, A. Saitoh, A. Kamitani: “High-Speed Simulation of Scanning Permanent Magnet Method by using H-Matrix Method,” The 28th International Symposium on Superconductivity, 2015 年.
- 37) A. Saitoh and A. Kamitani: “Numerical Investigation of Preconditioning for Iterative Methods in Linear Systems Obtained by Extended Element-Free Galerkin Method,” The 34th JSST Annual Conference: International Conference on Simulation Technology (JSST 2015), 2015 年.
- 38) T. Takayama, A. Kamitani and A. Saitoh: “High-Speed Method for Analyzing Shielding Current Density in HTS with Cracks: Implementation of H-Matrix Method to GMRES,” The 34th JSST Annual Conference: International Conference on Simulation Technology (JSST 2015), 2015 年.
- 39) A. Saitoh, N. Matsui, T. Itoh, A. Kamitani: “Accurate Solution of Axisymmetric MHD Equilibrium by Extended Boundary-Node Method,” The 17th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, 2015 年.
- 40) T. Takayama and A. Kamitani: “Acceleration for Shielding Current Analysis in Cracked Superconducting Film,” The 17th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, 2015 年.
- 41) 高山彰優, 齋藤歩, 神谷淳: 「HTS 薄膜内遮蔽電流密度解析の高速化: 行列ベクトル積への H 行列法の実装」, 日本応用数学会 2015 年度年会, 2015 年.
- 42) T. Takayama and A. Kamitani: “Numerical Simulation of Standard/Scanning Permanent Magnet Methods for Measuring j_c in HTS Film,” Magnet Technology 24, 2015 年.
- 43) A. Kamitani, T. Takayama, A. Saitoh: “High-Speed Shielding Current Analysis in High-Temperature Superconducting Film with Cracks,” The 20th International Conference on the Computation of electromagnetic Fields (Compumag 2015), 2015 年.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況 (計 0 件)
取得状況 (計 0 件)

〔その他〕
ホームページ等 無し

6. 研究組織

(1) 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