

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月25日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560287

研究課題名（和文） 高温超伝導体の応用機器設計を前提とした高精度・高速電磁界解析技術の開発

研究課題名（英文） Development of High-Performance Electromagnetic Analysis for Design of 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

研究成果の概要（和文）：

高温超伝導体を工学的に応用する際には、遮蔽電流密度の解析が必要不可欠である。それ故、遮蔽電流密度の様々な解析法がこれまで開発されてきた。しかしながら、従来の解析手法は(1)陰解法に起因する低速性と(2)クラック・穴への対応不可能性という2つの致命的な問題点を含んでいた。本研究では、この2つの問題点を解決するために、構成方程式修正法と仮想電圧法という2種類の数値解析技術を開発した。

研究成果の概要（英文）：

Since evaluation of the shielding current density is indispensable to engineering applications of high-temperature superconductors (HTSs), various numerical methods have been so far developed for analyzing the shielding current density. However, all of the methods have been plagued by the following two fatal difficulties: (1) slow speed due to implicit schemes and (2) disability to treat HTS samples containing cracks or holes. In the present study, two novel numerical techniques, i.e. constitutive-relation-modification method and virtual-voltage method, are proposed for resolving the above two difficulties.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学，電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：電気機器，超伝導機器，高温超伝導体，遮蔽電流密度，数値シミュレーション

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の電磁界の解析が必要不可欠である。

一方、ここ10数年の間に、コンピュータは急速に高性能化、ダウンサイジング化され

てきた。さらに、それに伴う電磁界解析技術の進歩は、現実的な条件のもとでの解析を可能とし、機器設計に画期的な進歩をもたらした。その反面、設計や解析の対象がますます複雑化、大規模化する傾向にあるため、高速解法、高精度解法の開発が望まれている。

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評価するための高精度・高速電磁界解析技術を開発し、さらに、同技術を用いて超伝導応用機器の周辺電磁界を調べる。

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解析する手法を考案し、同手法を用いて超伝導応用機器を解析することである。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」からなる3つフェーズを設定している。

「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、有限要素法とメッシュレス法という2種類の離散化法を用いて、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。いずれの離散化法を用いた場合でも、行列要素の計算と大規模連立非線形方程式の解法が数値シミュレーションのCPU時間の大部分を占めることになる。それ故、本研究では、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に処理する。

「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、磁気遮蔽装置（例えば、磁気遮蔽ルーム）の遮蔽性能を定量的に評価する。さらに、超伝導磁気浮上システムにおける動的電磁力や超伝導送電の交流損失も定量的に評価する。

3. 研究の方法

(1) 研究体制

本研究を推進するための体制は次の通りである。まず、山形大学の神谷は高温超伝導体の実験データを収集することにより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理モデルを提案する。さらに、2次元数値シミュレーション・コードを用いて同モデルの妥当性を検討する。もし、提案した数理モデルによる数値シミュレーションが単一超伝導体の実験結果を再現できない場合には、数理モデルを再検討する。この一連の作業により、超伝導体の混合状態を記述する数理モデルが完成することになる。その

間、神谷研究室のスタッフ（技術職員1名高山彰優、大学院生2名）は、Linuxを搭載したPCクラスタによる並列分散処理環境を構築した後、並列分散処理技術の習得を行う。

次に、神谷およびスタッフはメッシュレス法、有限要素法を用いて、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、両コードの比較検討を行う。このように2つの別々の離散化法を用いたシミュレーション・コードを開発すれば、両法の精度、高速性、前処理の煩雑さ等を比較できるばかりか、両コードの解析結果がほぼ一致すれば、シミュレーション・コードの正当性も間接的に実証されたことになる。

最終段階では、シミュレーション結果の画像処理を行うことにより、遮蔽電流密度と生成磁界の時間発展を再現する可視化・アニメーション化プログラムを開発する。同時に、高速・高精度解析を目的として、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。

以上が研究代表者と研究室スタッフの役割分担及び研究方法の概略である。

(2) 開発コードの工学的応用

3次元遮蔽電流密度シミュレーション・コードは高温超伝導体の遮蔽電流密度が支配的な役割を演じる工学的応用分野の解析に適用できる。それ故、本研究では、

①磁気遮蔽性能解析

②臨界電流密度の非接触測定法の再現

の2テーマに対して、数値シミュレーション・コードを応用する。

①では、並列版3次元コードを用いて超伝導磁気遮蔽装置の性能解析を行い、磁気遮蔽装置の設計指針を導く。

②では、高温超伝導体バルクや薄膜の臨界電流密度の非接触測定法として知られている誘導法や永久磁石法を数値的に再現する。さらに、運転条件や試料状態が両法の精度に及ぼす影響を調べる。

4. 研究成果

高温超伝導体 (HTS) を工学的に応用する際には、遮蔽電流密度解析が必要不可欠である。それ故、遮蔽電流密度の様々な解析法がこれまで開発されてきた。しかしながら、従来の解析手法は(1)低速性と(2)クラック・穴への対応不可能性という2つの致命的な問題点を含んでいた。本研究では、この2つの問題点を解決するために、構成方程式修正法と仮想電圧法という2種類の数値解析技術を開発した。以下では、順を追って本研究で開発された数値解析技術とその成果を説明する。

(1) 構成方程式修正法

1990年代前半に開発された仮想導電率法

は逐次近似法の1種であるため、 $J-E$ 構成方程式が強非線形性を示す HTS の解析には適さないばかりか、その収束特性は1次収束を示す。言い換えれば、仮想導電率法は低速かつ不安定である。これに対して、1999年に著者等は直接離散化法を提案した。遮蔽電流密度方程式の初期値・境界値問題を空間に関して離散化すると、同問題は連立非線形常微分方程式(連立非線形 ODE)の初期値問題に帰着する。従来の直接離散化法では、同初期値問題に陰解法を適用し、各時間ステップで連立非線形方程式を解いていた。しかしながら、この非線形方程式は線形部に密行列を含むため、その解法は極端にCPU時間を浪費する。この意味から、連立非線形 ODE は陰解法以外の方法を用いて解くべきである。

本研究では、上記連立非線形 ODE を解くための高速解析法を Runge-Kutta 法を基にして開発することを目指した。しかしながら、たとえステップ幅自動制御アルゴリズム (ASSC) を組み込んだとしても、連立非線形 ODE は必ずしも同法で解けるわけではない。この難点を克服するため、著者等は遮蔽電流密度を解析するための以下の方法を提案した：

- ① 遮蔽電流密度のある上限以下で $J-E$ 構成方程式を修正した後、ASSC を実装した Runge-Kutta 法によって遮蔽電流密度方程式の初期値・境界値問題を解く。
- ② 数値解が上限を超えているか否かを数値的に判定する。もし数値解が不等式を満足する場合には、数値解は元の $J-E$ 構成方程式の解として許容できることになる。

以下では、上記方法を構成方程式修正法と呼ぶことにする。数値実験により、従来法と比べて構成方程式修正法が極めて高速かつ安定であることが判明した。

さらに、修正構成方程式法を実装した3次元遮蔽電流密度解析コードを開発し、同コードを用いて、磁石位置が永久磁石法の精度に及ぼす影響を調べた。その結果、次の結論を得た：

- ① 磁石位置に無関係に、臨界電流密度は最大反発力の比例する。
- ② 臨界電流密度と最大反発力の比例係数は薄膜のエッジ近傍で大きく変化する。この傾向は、永久磁石法の精度が薄膜のエッジ近傍で著しく劣化することを意味する。

(2) 仮想電圧法

従来、全ての遮蔽電流密度解析法は、穴やクラックを含まない HTS 試料だけに適用できるものであった。これは、遮蔽電流密度方程式自体が境界条件を含むように定式化され

たことに起因する。本研究では、穴やクラックを含む HTS 薄膜中を流れる遮蔽電流密度の時間発展を記述する支配方程式を再定式化し、同方程式の初期値・境界値問題を解くための安定かつ高精度な計算手法を開発することを目指した。

上記目的を達成するため、準定常近似と薄板近似の下で遮蔽電流密度の支配方程式と境界条件を定式化し直した。しかしながら、クラックや穴の表面上での境界条件は弱形式に完全に組み込まれるため、数値解はクラックや穴の表面上での Faraday 則を厳密には満たさない。それどころか、膜厚が薄くなるほど、Faraday 則の数値誤差は顕著になる。この難点を解決するため、クラックや穴の表面上で仮想電圧を印加することによって、Faraday 則を数値的に満足させる手法(仮想電圧法)を著者等は提案した。

仮想電圧法を用いて、多重連結断面をもつ HTS 薄膜中を流れる遮蔽電流密度を解析するための数値シミュレーション・コードを開発した。同コードを用いて、クラックが永久磁石法の精度に及ぼす影響を数値的に調べた結果、次のような結論を得た：

- ① 永久磁石から半径の約3倍以内の距離にクラックが入ると、永久磁石法の精度は劣化し始める。
- ② クラックの寸法が増加するにつれて、遮蔽電流密度の軸対称性は次第に失われ、ついには、永久磁石法の精度は著しく劣化する。

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 38 件)

- 1) T. Takayama, A. Kamitani, A. Saitoh and H. Nakamura: "Numerical Investigation on Accuracy and Resolution of Contactless Methods for Measuring j_c in High-Temperature Superconducting Film: Inductive Method and Permanent Magnet Method," Plasma Fusion Res., 査読有, Vol. 7 (2012) 2405017, DOI: 10.1585/pfr.7.2405017.
- 2) A. Kamitani, T. Takayama, A. Saitoh and H. Nakamura: "Accurate and Stable Numerical Method for Analyzing Shielding Current Density in High-Temperature Superconducting Film Containing Cracks," Plasma Fusion Res., 査読有, Vol. 7 (2012) 2405024, DOI: 10.1585/pfr.7.2405024.
- 3) S. Ikuno, Y. Fujita, T. Itoh, S. Nakata, H. Nakamura and A. Kamitani: "Numerical Simulation of Electro-

- magnetic Wave Propagation using Time Domain Meshless Method,” Plasma Fusion Res., 査読有, Vol. 7 (2012) 2406044, DOI: 10.1585/pfr.7.2406044.
- 4) A. Kamitani and T. Takayama: “Numerical Simulation of Shielding Current Density in High-Temperature Superconducting Film: Influence of Film Edge on Permanent Magnet Method,” IEEE Trans. Magn., 査読有, Vol. 48, No. 2 (2012) 727-730, DOI: 10.1109/TMAG.2011.2175373.
 - 5) A. Saitoh, T. Itoh, N. Matsui, and A. Kamitani: “Application of Extended Element-Free Galerkin Method to Nonlinear Problem,” IEEE Trans. Magn., 査読有, Vol. 48, No. 2 (2012) 487-490, DOI: 10.1109/TMAG.2011.2175904.
 - 6) K. Hattori, A. Saito, Y. Takano, T. Suzuki, H. Yamada, T. Takayama, A. Kamitani and S. Ohshima: “Detection of smaller J_c region and damage in YBCO coated conductors by using permanent magnet method,” Physica C, 査読有, Vol. 471 (2011) 1033-1035, DOI: 10.1016/j.physc.2011.05.117.
 - 7) A. Kamitani, T. Takayama, T. Itoh and S. Ikuno: “Numerical investigations on contactless methods for measuring critical current density in HTS: application of modified constitutive-relation method,” Physica C, 査読有, Vol. 471 (2011) 1163-1166, DOI: 10.1016/j.physc.2011.05.149.
 - 8) T. Takayama, A. Kamitani, T. Itoh and H. Nakamura: “Numerical Investigation on Accuracy Improvement of Permanent Magnet Method for Measuring j_c in High-Temperature Superconducting Film,” Plasma Fusion Res., 査読有, Vol. 6 (2011) 2401059, DOI: 10.1585/pfr.6.2401059.
 - 9) A. Kamitani, T. Takayama, T. Itoh and H. Nakamura: “Extension of Meshless Galerkin/Petrov-Galerkin Approach without Using Lagrange Multipliers,” Plasma Fusion Res., 査読有, Vol. 6 (2011) 2401074, DOI: 10.1585/pfr.6.2401074.
 - 10) S. Ikuno, T. Takayama, and A. Kamitani: “Numerical Investigations on Edge Effects of Shielding Current Density in HTS Thick Film,” IEEE Trans. Appl. Supercond., 査読有, Vol. 21, No. 3 (2011) 3222-3225, DOI: 10.1109/TASC.2010.2091242.
 - 11) T. Takayama, A. Kamitani, K. Hattori, A. Saito, and S. Ohshima: “Numerical Investigation of Inductive and Permanent-Magnet Methods to Measure Critical Current Density of HTS Thin Films,” IEEE Trans. Appl. Supercond., 査読有, Vol. 21, No. 3 (2011) 3360-3363, DOI: 10.1109/TASC.2010.2082478.
 - 12) A. Kamitani, T. Takayama, and S. Ikuno: “High-Performance Simulation of Shielding Current Density in HTS by Constitutive-Relation Relaxation Method,” IEEE Trans. Appl. Supercond., 査読有, Vol. 21, No. 3 (2011) 3364-3368, DOI: 10.1109/TASC.2010.2077270.
 - 13) S. Ohshima, K. Umezu, K. Hattori, H. Yamada, A. Saito, T. Takayama, A. Kamitani, H. Takano, T. Suzuki, M. Yokoo, and S. Ikuno: “Detection of Critical Current Distribution of YBCO-Coated Conductors Using Permanent Magnet Method,” IEEE Trans. Appl. Supercond., 査読有, Vol. 21, No. 3 (2011) 3385-3388, DOI: 10.1109/TASC.2010.2084053.
 - 14) A. Kamitani, T. Takayama, and S. Ikuno: “High-Speed Method for Analyzing Shielding Current Density in High-Temperature Superconductor,” IEEE Trans. Magn., 査読有, Vol. 47, No. 5 (2011) 1138-1141, DOI: 10.1109/TMAG.2010.2080263.
 - 15) A. Saitoh, N. Matsui, T. Itoh, and A. Kamitani: “Development of 2-D Meshless Approaches Without Using Integration Cells,” IEEE Trans. Magn., 査読有, Vol. 47, No. 5 (2011) 1222-1225, DOI: 10.1109/TMAG.2010.2079919.
 - 16) S. Ikuno, T. Takayama, and A. Kamitani: “Weight Function Control of Moving Least-Squares Interpolants: Application to Axisymmetric Shielding Current Analysis in HTS,” IEEE Trans. Magn., 査読有, Vol. 46, No. 8 (2010) 3097-3100, DOI: 10.1109/TMAG.2010.2044021.
 - 17) T. Takayama and A. Kamitani: “Numerical Simulation of Permanent Magnet Method: Applicability to $j(C)$ -Measurement in HTS Thick Film,” IEEE Trans. Appl. Superconductivity, 査読有, Vol. 20, No. 3 (2010) 1021-1024, DOI: 10.1109/TASC.2009.2039860.

- 18) T. Takayama, A. Kamitani, and H. Nakamura: "Numerical Simulation of Contactless Methods for Measuring j_c -Distribution of High Temperature Superconducting Thin Film," Plasma Fusion Res., 査読有, Vol. 5 (2010) S2113, DOI: 10.1585/pfr.5.S2113.
- 19) T. Takayama, A. Kamitani, and A. Tanaka: "Numerical Simulation of Permanent Magnet Method: Influence of Experimental Conditions on Accuracy of j_c -distribution," Physica C, 査読有, Vol. 470 (2010) 1354-1357, DOI: 10.1016/j.physc.2010.05.111.
- 20) A. Kamitani, T. Takayama, and H. Nakamura: "High Performance Analysis of Shielding Current Density in High Temperature Superconducting Thin Film," Plasma Fusion Res., 査読有, Vol. 5 (2010) S2112, DOI: 10.1585/pfr.5.S2112.
- 21) A. Kamitani, T. Takayama, A. Tanaka, and S. Ikuno: "Numerical Simulation of Inductive Method for Determining Spatial Distribution of Critical Current Density," Physica C, 査読有, Vol. 470 (2010) 1189-1192, DOI: 10.1016/j.physc.2010.05.071.
- 22) A. Kamitani, T. Takayama, and S. Ikuno: "Novel Applications of Inductive Method for Measuring Critical Current Density," IEEE Trans. Magn., 査読有, Vol. 46, No. 8 (2010) 3073-3076, DOI: 10.1109/TMAG.2010.2044562.
- 23) S. Ikuno, T. Takayama, A. Kamitani, K. Umetsu, A. Saito, and S. Ohshima: "Experimental and Numerical Investigations on Permanent Magnet Method for Measuring Critical Current Density in HTS Films," Physica C, 査読有, Vol. 469 (2009) 1559-1562, DOI: 10.1016/j.physc.2009.05.224.
- 24) T. Takayama, A. Kamitani, A. Tanaka, and S. Ikuno: "Numerical Simulation of Shielding Current Density in HTS: Application of High-Performance Method for Calculating Improper Integrals," Physica C, 査読有, Vol. 469 (2009) 1439-1442, DOI: 10.1016/j.physc.2009.05.054.
- 25) A. Kamitani, T. Takayama, A. Tanaka, and S. Ikuno: "Numerical Simulation of Inductive Method for Measuring Critical Current Density: Dependence of Accuracy on Shape and Configuration of Coil," Physica C, 査読有, Vol. 469 (2009) 1254-1257, DOI: 10.1016/j.physc.2009.05.114.
- 26) A. Kamitani, T. Takayama, and S. Ikuno: "Numerical Investigations on Inductive Method for Film/Bulk Superconductors," IEEE Trans. Magn., 査読有, Vol. 45, No. 3 (2009) 1230-1233, DOI: 10.1109/TMAG.2009.2012574.
- 27) A. Kamitani, T. Takayama, and S. Ikuno: "Axisymmetric Simulation of Inductive Measurement Method for Critical Current Density in Bulk HTS: Relation between Third Harmonic Voltage and Coil Current," IEEE Trans. Appl. Superconductivity, 査読有, Vol. 19, No. 3 (2009) 2901-2904, DOI: 10.1109/TASC.2009.2018795.
- 28) T. Takayama and A. Kamitani: "Numerical Simulation of Inductive Measurement Method for Critical Current Density in HTS Thin Film: Influence of DC Magnetic Field on Accuracy," IEEE Trans. Appl. Superconductivity, 査読有, Vol. 19, No. 3 (2009) 3573-3576, DOI: 10.1109/TASC.2009.2017847.

他 10 件

[学会発表] (計 41 件)

- 1) 神谷 淳: 「クラックや穴を含む高温超伝導薄膜中における遮蔽電流密度の高性能解析法」, 2011 年度【プラズマ壁相互作用シミュレーション解析に関する研究会】非線形解析部門研究会, 2012 年 3 月 12 日, 核融合科学研究所 (岐阜県)
- 2) 高山 彰優: 「高温超伝導体の臨界電流密度に対する走査型永久磁石法の数値シミュレーション: クラックが精度に及ぼす影響」, 2011 年度【プラズマ壁相互作用シミュレーション解析に関する研究会】非線形解析部門研究会, 2012 年 3 月 13 日, 核融合科学研究所 (岐阜県)
- 3) A. Kamitani: "Accurate and Stable Numerical Method for Analyzing Shielding Current Density in High-Temperature Superconducting Film Containing Cracks," 21st International Toki Conference (ITC-21), 2011 年 11 月 29 日 セラトピア土岐 (岐阜県)
- 4) T. Takayama: "Numerical Investigation on Accuracy and Resolution of Contactless Methods for Measuring j_c in High-Temperature Superconducting Film: Inductive Method and Per-

- manent Magnet Method,” 21st International Toki Conference (ITC-21), 2011年11月29日, セラトピア土岐(岐阜県)
- 5) T. Takayama: “Numerical Investigation on Scanning Permanent Magnet Method: Influence of Crack on Resolution and Accuracy,” 24th International Symposium on Superconductivity (ISS2011), 2011年10月26日, タワーホール船堀(東京都)
 - 6) A. Kamitani: “Shielding Current Analysis in HTS Film Containing Cracks: Application to Contactless Measurement Method of Critical Current Density,” 24th International Symposium on Superconductivity (ISS2011), 2011年10月26日, タワーホール船堀(東京都)
 - 7) S. Ikuno: “Numerical Investigations on Influence of Hole on Permanent Magnet Method,” 24th International Symposium on Superconductivity (ISS2011), 2011年10月26日, タワーホール船堀(東京都)
 - 8) T. Takayama: “Time-Domain FEM Analysis of Shielding Current Density in High-Temperature Superconducting Film with Crack: Application to Permanent Magnet Method,” 30th JSST Annual Conference (JSST2011), 2011年10月22日, 東海大学高輪キャンパス(東京都)
 - 9) 神谷 淳: 「クラックを含む超伝導薄膜内の遮蔽電流密度解析」, 日本応用数理学会 2011年度年会, 2011年9月16日, 同志社大学今出川キャンパス(京都府)
 - 10) 神谷 淳: 「構成方程式修正法による高温超伝導体内遮蔽電流密度解析」, 第19回 MAGDA コンファレンス in 札幌, 2010年11月23日, 北海道大学学術交流会館(北海道)
 - 11) 生野壮一郎: 「EFG法を用いた超伝導内遮蔽電流密度シミュレーション」, 第19回 MAGDA コンファレンス in 札幌, 2010年11月23日, 北海道大学学術交流会館(北海道)
 - 12) S. Ikuno: “Novel Numerical Method for Analyzing Shielding Current Density in Various Shaped HTS,” 23rd International Conference on Superconductivity, 2010年11月3日, エポカル筑波(茨城県)
 - 13) T. Takayama: “Numerical Simulation of Permanent Magnet Method for Measuring Critical Current Density of HTS Thin Film: Influence of Crack on Accuracy,” 23rd International Conference on Superconductivity, 2010年11月3日, エポカル筑波(茨城県)
 - 14) 神谷 淳: 「修正構成方程式法による高温超伝導体内遮蔽電流密度解析」, 第4回シミュレーション科学シンポジウム, 2010年9月14日, 核融合科学研究所(岐阜県)
 - 15) 高山彰優: 「多層型高温超伝導体内の遮蔽電流密度解析」, 第4回シミュレーション科学シンポジウム, 2010年9月14日, 核融合科学研究所(岐阜県)
 - 16) 高山彰優: 「多層型高温超伝導体内の遮蔽電流密度解析」, 日本応用数理学会 2010年度年会, 2010年9月9日, 明治大学駿河台キャンパス(東京都)
 - 17) 高山彰優: 「高温超伝導薄膜内を流れる遮蔽電流密度の高性能解析」, 日本シミュレーション学会, 2010年6月20日, 山形大学米沢キャンパス(山形県)
 - 18) A. Kamitani: “High Performance Analysis of Shielding Current Density in High Temperature Superconducting Thin Film,” 19th Toki Conference on Advanced Physics and Fusion Research, 2009年12月10日, セラトピア土岐(岐阜県)
 - 19) T. Takayama: “Numerical Simulation of Contactless Methods for Measuring j_c -Distribution of High-Temperature Superconducting Thin Film,” 19th Toki Conference on Advanced Physics and Fusion Research, 2009年12月10日, セラトピア土岐(岐阜県)
 - 20) S. Ikuno: “Three-Dimensional Simulation of Shielding Current Density in HTS Using Element-Free Galerkin Method,” 22nd International Symposium on Superconductivity, 2009年11月4日, エポカル筑波(茨城県)
 - 21) 高山彰優: 「高温超伝導体内の遮蔽電流密度解析Ⅲー永久磁石法による j_c 分布の決定ー」, 日本応用数理学会 2009年度年会, 2009年9月28日, 大阪大学豊中キャンパス(大阪府)

他 20 件

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