

平成 21 年 6 月 3 日現在

研究種目： 基盤研究(C)
 研究期間： 2007～2008
 課題番号： 19560276
 研究課題名（和文） 高温超伝導体の電磁界解析に関する高速数値解析技術の開発
 研究課題名（英文） Development of Fast Numerical Methods for
 Electromagnetic Analysis in High-Temperature Superconductors
 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：本研究では、高温超伝導体中を流れる遮蔽電流密度の時間発展を解析する高速・高精度数値シミュレーション・コードを開発し、臨界電流密度の非接触・無侵襲測定である誘導法と永久磁石法を同コードによって数値的に再現することに成功した。その際、数値シミュレーションを高精度化する目的で、特異積分の評価方法として 2 重指数関数型積分公式と正則化積分公式を採用した。その結果、数十 nm の厚みをもつ超伝導薄膜を流れる遮蔽電流密度を高精度に計算することが可能となった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2008 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：超伝導工学

科研費の分科・細目：電力工学・電気機器工学

キーワード：酸化物超伝導体、混合状態、有限要素法、臨界電流密度、非接触測定法、数値シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

(1) 研究背景と必要な技術

従来、非接触で生体構造を探るため MRI が用いられてきたが、MRI が発する人工磁場の生体に及ぼす影響は全くないとは断言できない。これに対して、近年、脳、肺から発する 10fT 程度の生体磁場を SQUID で検出することにより、人工磁場を生体に晒すことなく生体構造を診断する方法が提唱されている。現在の SQUID 感度は 20fT/Hz^{1/2} 程度であるため、生体磁場信号を測定するには環境磁場を遮断する必要がある。従来、磁気遮蔽

には強磁性体や良導体を用いられてきたが、地磁気を含む 10Hz 以下の低周波磁場をこれらの媒質で遮蔽することは困難である。低周波磁場の遮蔽方法として、酸化物超伝導体を用いることが近年提唱されている。これは、小型冷凍機や液体窒素を用いて酸化物超伝導体を容易かつ安価に超伝導状態に保ち得るからである。さらに、超伝導磁気遮蔽は、印加磁場の周波数に依存しないことが予想される。上記理由から、酸化物超伝導体は新たな磁気遮蔽材料として近年注目を集めている。

本研究では、酸化物超伝導体中の遮蔽電流密度の時間発展を解析するための高速数値シミュレーション技術を開発し、さらに、同技術を用いて超伝導体の磁気遮蔽性能と交流印加磁場に対する非線形応答を調べる。この目的を達成するため、本研究で開発される数値シミュレーション技術は数理モデルと数値解析法の2種類に大きく分けることができる。

(2) 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、超伝導磁気遮蔽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、何れも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。

本研究の磁気遮蔽性能解析では、数 100 Hz 以下の低周波磁場を対象としているため、この周波数領域で有効な $J-E$ 構成方程式を模索する必要があり、場合によっては、新たなモデルを構築せねばならない。

(3) 数値解析法

MPMG 法で作られた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のである。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、大規模非線形方程式の高速数値解法、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。

2. 研究の目的

本研究の目的は、超伝導応用機器の解析を前提として、遮蔽電流密度の時間発展を解析する手法を開発することである。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」の3つ段階を設定した。

まず、「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。次に、「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非線形方程式の解法を高速に処理する。最後に、「工学的実証フェーズ」では、超伝導体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、交流印加磁場に対する超伝導バルク/薄膜の非線形応答も定量的に評価する。

3. 研究の方法

本研究を推進するために、先ず、研究代表者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。その間、神谷研究室のスタッフ (技術職員1名、大学院生2名) は、Linux を搭載したパソコン・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、辺要素型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。これが研究代表者 (神谷) とスタッフの研究方法に関する役割分担の概略である。

4. 研究成果

(1) 数値的研究成果

Claassen 等によって開発されて以来、誘導法は高温超伝導体 (HTS) 薄膜の臨界電流密度を非接触・無侵襲で測定する方法として広く採用されてきた。同法では、HTS の直上に配置したコイルに交流電流を流しながら、コイ

ルに誘起される第3高調波電圧が測定される。最近、馬渡等は誘導法を改良することによって、HTSバルクの臨界電流密度も測定できるようにした。

本研究では、HTS中を流れる遮蔽電流密度の時間発展を解析する数値シミュレーション・コードを開発し、同コードを用いて、次の2点を重点的に調査した。

- ① 臨界状態モデル以外の $J-E$ 構成方程式を仮定した場合に、馬渡理論が適用できるか？
- ② コイルの断面形状や配置は HTS バルクに対する誘導法の精度に如何なる影響を及ぼすか？

上記目的を達成するため、遮蔽電流密度の時間発展を解析するための数値コードを開発した。同コード内では、電流ベクトル・ポテンシャル法で定式化された支配方程式の初期値・境界値問題を有限要素法（または EFG 法）と後退 Euler 法を用いて解いている。

本研究では、数値シミュレーション・コードを用いて第3高調波電圧の印加電流に対する特性曲線を決定した後、臨界電流密度を数値的に見積もった。その結果得られた結論を要約すると、以下のようになる。

- ① HTS フィルムと HTS バルクに対して第3高調波電圧をコイル電流の関数として計算した。その結果、計算値は馬渡理論で得られる値と良く一致する。従って、馬渡理論は臨界状態モデル以外の $J-E$ 構成方程式にも適用できる。
- ② 誘導法の精度はコイル形状には全く影響されないが、コイル配置には強く依存する。

(2) 位置づけとインパクト

本研究では、DE 公式や Gauss-Legendre 公式を用いて特異積分を高精度に評価する技術を提唱し、同技術を基にして遮蔽電流密度解析コードを開発した。

従来、厚み対半径比が 10^{-5} 以下となる HTS 薄膜内に対する遮蔽電流密度の解析は不可能といわれてきた。しかしながら、厚み対半径比が 10^{-6} 程度となる HTS 薄膜内に対しても、本研究で開発された数値シミュレーション・コードは安定した動作を示している。この意味から、本研究で開発された高速高精度数値解析技術は今後超伝導薄膜解析にとって不可欠なものになると期待できる。

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 22 件)

1. 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* (in press), 査読有。

2. 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* (in press), 査読有。
3. 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* (in press), 査読有。
4. 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* (in press), 査読有。
5. 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* (in press), 査読有。
6. S. Ikuno, T. Takayama, A. Kamitani, A. Saito, and S. Ohshima: “Analysis of Measurement Method for Critical Current Density by Using Permanent Magnet,” *IEEE Trans. Appl. Superconductivity* (in press), 査読有。
7. A. Kamitani, T. Takayama, and S. Ikuno: “Numerical Investigations on Inductive Method for Film/Bulk Superconductors,” *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 45, No. 3 (2009) 1230-1233, 査読有。
8. A. Kamitani, T. Takayama, and S. Ikuno: “Numerical simulation of inductive method for measuring critical current density of HTS bulk,” *Physica C*, Vol. 468 (2008) 1490-1493, 査読有。
9. T. Takayama, A. Kamitani, and S. Ikuno: “Numerical simulation of inductive method for measuring critical current density of HTS thin film,” *Physica C*, Vol. 468 (2008) 1685-1687, 査読有。
10. S. Ikuno, T. Takayama, and A. Kamitani: “Numerical investigations on permanent magnet method using meshless

- approach,” *Physica C*, Vol. 468 (2008) 1693-1696, 査読有.
11. S. Ikuno, T. Takayama, and A. Kamitani: “Evaluation of AC Losses in High Tc Superconductor Thin Film by Element-Free Galerkin Method and Double Exponential Formula,” *IEEE Trans. Appl. Superconductivity*, Vol. 18, No. 2 (2008) 1349-1352, 査読有.
 12. T. Takayama, S. Ikuno, and A. Kamitani: “Numerical Simulation of Noncontact Method for Measuring Critical Current Density: Permanent Magnet Method and Inductive Method,” *IEEE Trans. Appl. Superconductivity*, Vol. 18, No. 2 (2008) 1577-1580, 査読有.
 13. S. Ikuno, T. Hanawa, T. Takayama, and A. Kamitani: “Evaluation of Parallelized Meshless Approach: Application to Shielding Current Analysis in HTS,” *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 44, No. 6 (2008) 1230-1233, 査読有.
 14. A. Kamitani, T. Takayama, and S. Ikuno: “Numerical Simulation of Inductive Method and Permanent Magnet Method for Measuring Critical Current Density,” *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 44, No. 6 (2008) 926-929, 査読有.
 15. 高山彰優, 神谷淳: 「高温超薄膜内の高精度遮蔽電流密度解析: 誘導法への応用」, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J91-C, No. 4 (2007) 235-243, 査読有.
 16. S. Ikuno, T. Takayama, and A. Kamitani: “Application of parallel processing technique to shielding current analysis on HTS thin film,” *Physica C*, Vol. 463-465 (2007) 1013-1016, 査読有.
 17. A. Kamitani, T. Takayama, and S. Ikuno: “Accurate numerical calculation of shielding current density in HTS thin film: applicatin to noncontact measurement method of critical current density,” *Physica C*, Vol. 463-465 (2007) 1009-1012, 査読有.
 18. T. Takayama, A. Kamitani, S. Ohshima and A. Saito: “Numerical Simulation of Permanent Magnet Method: Relation between Critical Current Density and Maximum Repulsive Force,” *IEEE Trans. Appl. Superconductivity*, Vol. 17, No. 2 (2007) 3745-3748, 査読有.
 19. A. Kamitani, T. Takayama, and S. Ikuno: “Accurate Calculation of Shielding Current Density in HTS Thin Film,” *IEEE Trans. Appl. Superconductivity*, Vol. 17, No. 2 (2007) 3749-3752, 査読有.
 20. S. Ikuno, K. Takakura, and A. Kamitani: “Influence of Method for Imposing Essential Boundary Condition on Meshless Galerkin/Petrov-Galerkin Approaches,” *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 43, No. 4 (2007) 1501-1504, 査読有.
 21. A. Saitoh and A. Kamitani: “Accuracy Improvement of Inner-Point Formula in Three-Dimensional BEM,” *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 43, No. 4 (2007) 1489-1492, 査読有.
 22. A. Kamitani, T. Takayama, and S. Ikuno: “Numerical Simulation of Shielding Current Density in High-Temperature Superconducting Thin Film,” *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 43, No. 4 (2007) 1377-1380, 査読有.
- [学会発表] (計 17件)
1. 神谷淳: 「積分セル非依存型完全Meshless法の開発」, 核融合科学研究所平成 20 年度一般共同研究成果報告会, 2009 年 1 月 23 日, 核融合科学研究所
 2. 齋藤歩, 神谷淳: 「セル無し二重相反境界節点法の開発」, 日本応用数理学会環瀬戸内応用数理研究部会第 1 2 回シンポジウム, 2008 年 10 月 12 日, 山形大学理学部
 3. 高山彰優, 神谷淳: 「高温超伝導体を流れる遮蔽電流密度の高精度解析法の開発」, 日本応用数理学会環瀬戸内応用数理研究部会第 1 2 回シンポジウム, 2008 年 10 月 11 日, 山形大学理学部
 4. 高山彰優, 神谷淳: 「高温超伝導薄膜内の遮蔽電流密度解析II: 誘導法への応用」, 日本応用数理学会 2008 年度年会, 2008 年 9 月 19 日, 東京大学柏キャンパス
 5. 齋藤歩, 神谷淳: 「積分セルを用いない境界節点法の開発: 2次元楕円型境界値問題への適用」, 日本応用数理学会 2008 年度年会, 2008 年 9 月 18 日, 東京大学柏キャンパス
 6. 高山彰優, 神谷淳, 生野壮一郎, 武石健太, 齋藤敦, 大嶋重利: 「永久磁石による臨界電流密度測定法の数値シミュレーション」, 2008 年度春季低温工学・超電導学会, 2008 年 5 月 27 日, 明星大学
 7. 大嶋重利, 齋藤敦, 高山彰優, 神谷淳, 生野壮一郎, 武石健太: 「永久磁石を用いた超電導薄膜のJc面内分布測定」, 2008 年度春季低温工学・超電導学会, 2008 年 5 月 27 日, 明星大学
 8. A. Saitoh and A. Kamitani: “Two-Dimensional Boundary Node Method without Cells: Application to Potential Problem,” The 13th International Conference on the

- Computation of Electromagnetic Fields (CEFC 2008), May 14, 2008, Athens, Greece
9. A. Kamitani, T. Takayama, and S. Ikuno: "Numerical Investigations on Inductive Method for Film/Bulk Superconductors," The 13th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (CEFC 2008), May 14, 2008, Athens, Greece
 10. 齋藤歩, 神谷淳: 「セルを用いない二次元境界節点法: 完全なメッシュレスを目指して」, 2008年日本シミュレーション学会研究委員会連合発表会, 2008年3月9日, 首都大学東京南大沢キャンパス
 11. 高山彰優, 神谷淳: 「高温超伝導体の臨界電流密度に対する非接触測定法の数値シミュレーション」, 2008年日本シミュレーション学会研究委員会連合発表会, 2008年3月9日, 首都大学東京, 南大沢キャンパス
 12. 生野壯一郎, 高山彰優, 神谷淳: 「メッシュレス法を用いた超伝導薄膜の遮蔽電流密度解析: 永久磁石法のシミュレーション」, 日本応用数理学会, 2007年9月17日, 北海道大学工学部
 13. 齋藤歩, 田中覚, 仲田晋, 神谷淳: 「境界節点法の高精度化II: 境界近傍での解の精度劣化を回避するためのアプローチ」, 日本応用数理学会, 2007年9月16日, 北海道大学工学部
 14. 高山彰優, 神谷淳: 「高温超伝導薄膜内の遮蔽電流密度解析: 誘導法のシミュレーション」, 日本応用数理学会, 2007年9月15日, 北海道大学工学部
 15. 大槻恭士, 神谷淳: 「積分セルを用いない境界節点法」, 日本応用数理学会, 2007年9月15日, 北海道大学工学部
 16. A. Saitoh and A. Kamitani: "Accuracy Improvement of BNM," The 16th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG 2007), 2007年6月27日, Eurogress, Aachen, Germany
 17. T. Hanawa, S. Ikuno, and A. Kamitani: Investigations on Iterative Method with Mixed-Precision on Cell Broadband Engine, The 16th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG 2007), 2007年6月28日, Eurogress, Aachen, Germany

6. 研究組織

(1) 研究代表者

神谷 淳 (KAMITANI ATSTUSHI)

山形大学・大学院理工学研究科・教授