

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C) (特設分野研究)

研究期間：2014～2016

課題番号：26520204

研究課題名(和文)形状関数の数値構造を用いた3次元完全メッシュレス法の高性能化

研究課題名(英文)Development of 3D High-Performance Complete Meshless Approaches by Using Mathematical Structure of Shape Functions

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) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：楕円型境界値問題に対してEFG法とX-EFG法による離散化を行うと、それぞれ対称と非対称係数行列をもつ連立1次方程式が得られる。しかしながら、Krylov空間法を得られた連立1次方程式の解法に適用すると、対称版・非対称版を問わず、拘束条件数の増加と共にKrylov空間法の収束特性は著しく劣化する。

収束特性の劣化を抑制するために、拘束条件行列の像空間とその直交補空間への射影子を用いて、連立1次方程式からLagrange未定乗数を完全に消去した。さらに、得られた連立1次方程式のソルバーにKrylov空間法を採用した結果、拘束条件数を増加させても収束特性が劣化しないことも数値的に実証した。

研究成果の概要(英文)：If the elliptic boundary-value problem is discretized with the meshless approaches such as the EFG and the X-EFG, a special type of linear system is obtained. However, when the Krylov space method is applied to the resulting system, its convergence property is remarkably degraded with an increase in the number of constraints.

For the purpose of suppressing degradation of the convergence property, projector matrices onto the image space of the constraint matrix and its orthogonal complement are defined and, by using the projector matrices, the Lagrange multipliers are completely eliminated from the linear system. Moreover, the resulting linear system is numerically solved with the Krylov space method. As a result, it is found that, even if the number of constraints is increased, the convergence property of the linear-system solver will not be degraded at all. Hence, the proposed method can be a powerful tool for solving a linear system obtained by the meshless approaches.

研究分野：シミュレーション科学, 計算科学, 数値解析

キーワード：メッシュレス法 Krylov空間法 形状関数 拘束条件付き連立1次方程式

### 1. 研究開始当初の背景

有限要素法 (FEM) と境界要素法 (BEM) はこれまで計算科学分野で幅広く用いられてきたが、FEM と BEM 自体が内包している問題点が 2 つ挙げられる。第 1 に、両法を用いた解析では、対象領域やその境界を要素の集合に分割する必要がある。しかし、要素分割は代数方程式を構成し解を求めるよりも、一般に、マンパワーと CPU 時間を浪費する。第 2 の問題点は、両法の数値解は滑らかさに限界があることである。この 2 つの問題点のため、CPU 時間は多少かかってもデータ準備にコストを要しない方法と滑らかな形状関数を基底にもつ関数空間内で弱形式や逆形式を離散化する手法の開発が望まれてきた。近年、上記問題点をある程度克服した方法として、メッシュレス法が注目を集めている。メッシュレス法は大きく有限節点法 (FNM) と境界節点法 (BNM) に分類できる。

従来型メッシュレス法では、対象領域を要素分割する必要はないが、行列要素を計算するためだけに対象領域または境界のセル分割が必要となる。もし境界曲面の陰関数表現から境界積分を計算するか、もしくは、境界条件を実装するのに境界積分を用いない手法を開発できれば、セル分割を行わないでメッシュレス法を再定式化できるはずである。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、領域の形状表現と補間関数の構成を完全に分離することにより、要素やセルの概念を完全に取り去った偏微分方程式の数値解法スキームを考案し、自然科学分野への同法の適用可能性を調べることにある。特に、領域の形状表現には陰関数曲面法を採用し、補間関数を節点座標だけから構成する。

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から成る 3 つの段階を設定している。「方法論開発フェーズ」では、陰関数曲面による境界形状表現と FNM、BNM との融合化をはかる。即ち、境界曲面の陰関数表現を用いて境界積分を計算する手法と境界条件の実装に境界積分を用いない手法を開発することにより、メッシュレス法から完全に「要素」の概念を取り除く。今後、「要素」の概念を全く含まないメッシュレス法を完全メッシュレス法と呼ぶ。

「高性能化フェーズ」では、形状関数の満たすべき数学的性質を洗い出すことにより、完全メッシュレス法の高精度化・高速化を目指す。従来、メッシュレス法では補間関数として、MLS 形状関数と RPIM 形状関数が用いられてきた。前者を用いた場合、MLS 形状関数がクロネッカー・デルタ特性を満たさないため、偏微分方程式の境界値問題は拘束条件付き連立 1 次方程式に帰着する。そのため、数千個以上の節点を用いて離散化した場合、得られた連立 1 次方程式に ICCG 法を適用し

ても、その収束特性が劣化し、数値解が得られない状況が生じる。これに対して、RPIM 形状関数を用いた場合、境界値問題は拘束条件付き連立 1 次方程式ではなく、疎行列に帰着する。そのため、節点数が 10 万以上であっても、ICCG 法で容易に近似解を得ることができる。「高性能化フェーズ」では、クロネッカー・デルタ特性を満足する補間関数が満たすべき条件を調べることにより、同条件を満たす補間関数群を決定し、同補間関数群の計算量の比較を行う。さらに、高速評価できる補間関数群の中から完全メッシュレス法を高精度化するものを数値実験によって模索する。

最後に、「工学的実証フェーズ」では、本研究で提案する完全メッシュレス法を電磁界解析に適用し、その有効性を数値的に実証してゆく。

### 3. 研究の方法

本研究を遂行するため、メンバーは基礎理論グループと数値実験グループに分ける。

#### 【基礎理論グループ】

筆者らの研究グループでは、ポテンシャル問題を解析する 2 次元完全メッシュレス・コード (以下、2 次元コードと略記) が既に開発されている。しかしながら、同じポテンシャル問題でも、2 次元と 3 次元では完全メッシュレス法の実装方法は著しく異なる。それ故、3 次元完全メッシュレス法の基礎理論を完成させることを基礎理論グループの当初目標とする。

先ず、基礎理論グループは、高速補間関数の選定と境界条件の実装法の提案を行い、その妥当性を検証する。

#### 【数値実験グループ】

齋藤、神谷等による先駆的研究によれば、ポテンシャル問題に完全メッシュレス法を適用した場合、現れる連立 1 次方程式がもつ係数行列の代数的構造は部分的メッシュレス法を適用した場合と酷似している。それ故、完全メッシュレス法を高速化するためには、部分的メッシュレス法を高速化する技術を確認すれば十分である。従って、部分的メッシュレス法を用いた際に現れる連立 1 次方程式の高速解法を提案することを高性能化グループの当初目標とする。

先ず、数値実験グループは部分的メッシュレス法の高速化をソルバーによって実現する。よく知られているように、離散化法 (FNM, BNM) によって連立 1 次方程式の係数行列は対称疎行列、非対称密行列の何れにもなり得る。それ故、離散化法に応じた前処理と Krylov 部分空間法の様々な組み合わせによって、ソルバーの選択肢が生じる。一旦ソルバーが選定されれば、その妥当性を 2 次元コードによって検証する。もし、ソルバーの収束特性が満足できるものでない場合には、ソルバーを再検討することによって最適なソルバーを得ることを目指す。

次に、数値実験グループは GPU 環境を前提とした並列分散処理環境に係数行列の計算を実装する。この一連の作業により、部分的メッシュレス法の高速化が完成する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 変数低減法の開発

Belytcheko 等によって開発された EFG 法は構造解析分野に適用され、着実に成果を収めてきた。しかしながら、EFG 法は基本境界条件の実装に Lagrange の未定乗数法を用いているため、基本境界条件が厳密には満たされないという欠点をもつ。上記問題を解決するため、著者等は X-EFG 法を提唱した。

楕円型自己随伴演算子を伴う境界値問題に対して、EFG 法と X-EFG 法による離散化では、それぞれ対称と非対称係数行列をもつ拘束条件付き連立 1 次方程式が得られる。しかしながら、Krylov 空間法を連立 1 次方程式に適用すると、対称版・非対称版を問わず、拘束条件数の増加と共に Krylov 空間法の収束特性は著しく劣化する。

収束特性の劣化を抑制するためには、連立 1 次方程式から Lagrange 未定変数を完全に消去する必要がある。例えば、対称版方程式の場合、先ず、拘束条件行列  $C$  を  $QR$  分解する。次に、 $\text{Range}(C)$  とその直交補空間への射影子を用いれば、Lagrange 未定変数を含まない連立 1 次方程式を得る。同方程式の変数は、元の方程式と比べて拘束条件の数だけ減少する。得られた連立 1 次方程式を数値的に解くことを変数低減法と名付けた。

本研究では、変数低減法のソルバーとして Krylov 空間法を採用した結果、従来法と比べて、変数低減法は少ない反復回数で解が得られることが判明した。さらに、変数低減法の収束特性は拘束条件数に影響されないことも数値的に実証された。

##### (2) 変数低減法による収束特性改善の証明

良く知られているように、対称版 Krylov 空間法の収束特性は係数行列の固有値分布によって定まる。即ち、係数行列の固有値が分布する範囲を狭めることができれば、Krylov 空間法の反復回数を減少させることができるのである。

本研究では、変数低減法の係数行列の固有値分布区間が元方程式の係数行列の固有値分布区間の部分集合になっていることを対称行列固有値の分離定理から証明した。一方、現時点では、非対称版の変数低減法の高速度の証明は完成していない。

##### (3) 遮蔽電流密度解析への応用

高温超伝導 (HTS) 薄膜内の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る。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ャ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。

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に変数低減法を応用することにより、変数低減法の有効性を数値的に評価した。さらに、Krylov 空間法で必要となる行列・ベクトル積に H-行列法を用いることにより、高速化も実現した。その結果、遮蔽電流密度解析の現れる拘束条件付き連立 1 次方程式の解法に変数低減法を適用し、さらに、行列・ベクトル積に H-行列法を用いれば、遮蔽電流密度解析のスピードを従来法と比べて約 19 倍まで高速化できることを実証した。

##### (4) 拡張境界節点法の応用

軸対称プラズマの電磁流体力学的平衡は Grad-Shafranov 方程式を解くことによって決定できる。従来、2 重相反境界要素法 (DRM) は同方程式の境界値問題に適用され、高精度な結果を残してきた。

近年、境界節点法は積分セルを用いない形で再定式化された。その結果として得られた拡張境界節点法 (X-BNM) の精度は DRM と比べて高い精度を示すことが数値的に示されている。さらに、RPIM 形状関数を採用すれば、X-BNM の計算スピードも飛躍的に改善できる。これらの結果は、DRM だけでなく X-BNM も Grad-Shafranov 問題に適用できることを示唆している。

本研究では、X-BNM を Grad-Shafranov 問題に適用し、DRM と比較することによって、その性能を評価した。その結果、X-BNM は DRM より遥かに高精度であることが判明した。この意味から、X-BNM は複雑な断面形状をもつ軸対称プラズマの平衡問題を解くための強力なツールとなり得ると言える。また、X-BNM 型連立 1 次方程式のソルバーとしては、 $LU$  分解等の直接法よりも、GMRES 等の Arnoldi 原理に基づく Krylov 部分空間法の方が遥かに適していることも判明した。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 21 件)

以下の論文は全て査読有である。

(1) 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) (in press).

(2) 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, No. 4 (2017) Art. No. 9000805.  
DOI: 10.1109/TASC.2016.2643506

(3) 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.  
DOI: 10.1585/pfr.11.2405041

(4) 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.  
DOI: 10.1585/pfr.11.2401043

(5) 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.  
DOI: 10.1585/pfr.11.2401062

(6) 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," J. Adv. Simul. Sci. Eng., Vol. 3, No. 2 (2016) 173-187.  
DOI: 10.15748/jasse.3.173

(7) 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, No. 2 (2016) 188-205.  
DOI: 10.15748/jasse.3.188

(8) A. Kamitani, T. Takayama and A. Saitoh: "High-Speed Shielding Current Analysis in High-Temperature Superconducting Film with Cracks," IEEE Trans. Magn., Vol. 52, No. 3 (2016) Art No. 7202404.  
DOI: 10.1109/TMAG.2015.2487343

(9) T. Takayama and A. Kamitani: "Acceleration for shielding current analysis in superconducting film containing cracks," Int. J. Appl. Electromagnetics Mech., Vol. 52, No. 1-2 (2016) 555-561.  
DOI: 10.3233/JAE-162031

(10) 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) 3401059.  
DOI: 10.1585/pfr.10.3401059

(11) 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) 3405023.  
DOI: 10.1585/pfr.10.3405023

(12) 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, No. 3 (2015) 9000104.  
DOI: 10.1109/TASC.2014.2361060

(13) A. Kamitani, T. Takayama and S. Ikuno: "High-Performance Method for Analyzing Shielding Current Density in HTS Film: Application to Scanning Permanent-Magnet Method," IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 25, No. 3 (2015) 9000505.  
DOI: 10.1109/TASC.2014.2373658

(14) A. Kamitani, T. Takayama and A. Saitoh: "Numerical Simulation of Permanent Magnet Method: Applicability to Crack Detection in High-Temperature Superconducting Film," IEEE Trans. Magn., Vol. 51, No. 3 (2015) 7000504.  
DOI: 10.1109/TMAG.2014.2360934

(15) A. Saitoh, T. Itoh, N. Matsui and A. Kamitani: "Performance Improvement of Extended Boundary Node Method," IEEE Trans. Magn., Vol. 51, No. 3 (2015) 7204704.  
DOI: 10.1109/TMAG.2014.2347336

(16) A. Kamitani, T. Takayama and A. Saitoh: "Numerical investigations on applicability of permanent magnet method to crack detection in HTS film," Physica C, vol. 504 (2014) 57-61.  
DOI: 10.1016/j.physc.2014.04.016

(17) A. Kamitani, T. Takayama, S. Ikuno and H. Nakamura: "Numerical Investigations on Crack Identification in High-Temperature Superconducting Film," Plasma Fusion Res., Vol. 9 (2014) 3405085.  
DOI: 10.1585/pfr.9.3405085

(18) A. Saitoh, A. Kamitani and H. Nakamura: "Speed-Up Technique of Extended Boundary Node Method for Large-Scale Simulation," Plasma Fusion Res., Vol. 9 (2014) 3401061.  
DOI: 10.1585/pfr.9.3401061

(19) T. Takayama, A. Kamitani, S. Ikuno and H. Nakamura: "Numerical Simulation of Contactless Methods for Measuring  $j_c$  in High-Temperature Superconducting Film: Influence of Defect on Resolution and Accuracy," Plasma Fusion Res., Vol. 9 (2014) 3401129.  
DOI: 10.1585/pfr.9.3401129

(20) T. Takayama and A. Kamitani: "Numerical Investigation on Crack Detection in HTS Film: Accuracy of Scanning Permanent Magnet Method," IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 24, No. 3 (2014) 9001505.  
DOI: 10.1109/TASC.2013.2290711

(21) A. Saitoh, T. Itoh, N. Matsui and A. Kamitani: "Acceleration Technique for Extended Boundary-Node Method," IEEE Trans. Magn., Vol. 50, No. 2 (2014) 7011404.  
DOI: 10.1109/TMAG.2013.2285587

〔学会発表〕(計 49 件)

(1) Atsushi Kamitani, Teruou Takayama,

Ayumu Saitoh: Acceleration Methods for Shielding Current Analysis in Cracked Superconducting Film, 2017 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM 2017), 2017年03月08日-2017年03月10日, くまもと県民交流館パレア(熊本県熊本市)

(2) Ayumu Saitoh, Teruou Takayama and Atsushi Kamitani: Meshless Approach for Solving Internal and External Boundary-Value Problem, 2017 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM 2017), 2017年03月08日-2017年03月10日, くまもと県民交流館パレア(熊本県熊本市)

(3) Teruou Takayama, Ayumu Saitoh and Atsushi 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03月08日-2017年03月10日, くまもと県民交流館パレア(熊本県熊本市)

(4) 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01月30日-2017年01月31日, 核融合科学研究所(岐阜県土岐市)

(5) Teruou Takayama, Ayumu Saitoh, Atsushi Kamitani: Numerical Investigation on Detection of Internal Crack in HTS Film by Using Contactless Method for Measuring  $j_c$ , 29th International Symposium on Superconductivity, 2016年12月13日-2016年12月15日, 東京国際フォーラム(東京都千代田区)

(6) Atsushi Kamitani, Teruou Takayama, Ayumu Saitoh: High-Speed Shielding Current Analysis in Cracked HTS Film: Implementation of H-Matrix Method and Variable Reduction Method, 29th International Symposium on Superconductivity, 2016年12月13日-2016年12月15日, 東京国際フォーラム(東京都千代田区)

(7) Atsushi Kamitani, Teruou Takayama, Ayumu 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12月06日-2016年12月09日, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (バンコク・タイ王国)

(8) 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11月24日-2016年11月25日, 桐生市市民文化会館(群馬県桐生市)

(9) Atsushi Kamitani, Teruou Takayama,

Ayumu Saitoh, and Soichiro 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11月13日-2016年11月16日, Hilton Miami-Downtown(マイアミ・アメリカ合衆国)

(10) Teruou Takayama, Ayumu Saitoh and Atsushi 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10月27日-2016年10月29日, 京都大学国際科学イノベーション棟(京都府京都市)

(11) Ayumu Saitoh, Teruou Takayama and Atsushi 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10月27日-2016年10月29日, 京都大学国際科学イノベーション棟(京都府京都市)

(12) 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, 日本応用数理学会 2016 年度年会, 2016年09月12日-2016年09月14日, 北九州国際会議場(福岡県北九州市)

(13) 齋藤歩, 高山彰優, 神谷淳: メッシュレス法を用いた内部・外部混合境界値問題の数値解法, 日本応用数理学会 2016 年度年会, 2016年09月12日-2016年09月14日

北九州国際会議場(福岡県北九州市)

(14) T. Takayama and A. Kamitani: Acceleration Technique for Shielding Current Analysis in Superconducting Film with Cracks, 2015 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA 2015), 2015年12月01日-2015年12月04日, City University of Hong Kong Kowloon (Hong Kong・中国)

(15) T. Takayama, A. Saitoh and A. Kamitani: High-Speed Simulation of Scanning Permanent Magnet Method by using H-Matrix Method, 28th International Symposium on Superconductivity, 2015年11月16日-2015年11月18日, Tower Hall Funabori (東京都江戸川区)

(16) 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11月12日-2015年11月14日, 東北大学・電気通信研究所および流体科学研究所(宮城県仙台市)

(17) T. Takayama and A. Kamitani: Numerical Simulation of Standard/ Scanning Permanent Magnet Method for Measuring  $j_c$  in HTS, Magnet Technology 24, 2015年10月18日-2015年10月23日, COEX Center (ソウル・韓国)

(18) 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10月12日-2015年10月14日, Toyama International Conference Center (富山県富山市)

(19) A. Saitoh and A. Kamitani: Numerical Investigation of Preconditioning for Iterative Methods in Linear System Obtained by Extended Element-Free Galerkin Method, The 34th JSST Annual Conference: International Conference on Simulation Technology (JSST 2015), 2015年10月12日-2015年10月14日, Toyama International Conference Center (富山県富山市)

(20) A. Saitoh, N. Matsui, T. Itoh, and A. Kamitani: Accurate Solution of Axisymmetric MHD Equilibrium by Extended Boundary-Node Method, The 17th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, 2015年09月15日-2015年09月18日, Awaji Yumebutai International Conference Center (兵庫県淡路市)

(21) 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09月09日-2015年09月11日, 金沢大学角間キャンパス (石川県金沢市)

(22) Ayumu Saitoh, Taku Itoh, Nobuyuki Matsui, Atsushi Kamitani: Numerical Technique Based on Extended Boundary Node Method for Solving Grad-Shafranov Equation, Compumag 2015, 2015年06月28日-2015年07月02日, McGill University (モントリオール・カナダ)

(23) 齋藤歩, 伊東拓, 松井伸之, 神谷淳: 拡張境界節点法による Grad-Shafranov 方程式の境界値問題の数値解法, 2014年度【プラズマ壁相互作用に関する新規シミュレーション手法開発に関する研究会】第1回非線形・可視化部門研究会, 2015年01月27日-2015年01月27日, 核融合科学研究所 (岐阜県土岐市)

(24) 高山彰優, 神谷淳: HTS 薄膜内遮蔽電流密度解析の高速化, 2014年度【プラズマ壁相互作用に関する新規シミュレーション手法開発に関する研究会】第1回非線形・可視化部門研究会, 2015年01月27日-2015年01月27日, 核融合科学研究所 (岐阜県土岐市)

(25) 高山彰優, 神谷淳: HTS 薄膜内遮蔽電流密度の高速解析, 第23回 MAGDA コンファレンス in 高松, 2014年12月04日-2014年12月04日, サポート高松 (香川県高松市)

(26) 齋藤歩, 伊東拓, 松井伸之, 神谷淳: 拡張境界節点法による Grad-Shafranov 方程式の数値解法, 第23回 MAGDA コンファレンス in

高松 2014年12月05日-2014年12月05日, サポート高松 (香川県高松市)

(27) A. Kamitani, T. Takayama, A. Saitoh: Numerical Simulation of Contactless Crack-Detection Method in HTS Film: Acceleration with Block LU Decomposition The 27th International Symposium on Superconductivity, 2014年11月26日-2014年11月26日, Tower Hall Funabori (東京都江戸川区)

(28) T. Takayama and A. Kamitani: High-Performance Method for Analyzing Shielding Current Density in High-Temperature Superconducting Film with Cracks, The 33rd JSST International Conference on Simulation Technology (JSST 2014), 2014年10月30日-2014年10月30日, Kitakyushu International Conference Center (福岡県北九州市)

(29) 高山 彰優, 神谷淳: クラックを含む高温超伝導薄膜内を流れる遮蔽電流密度の高性能解析, 日本応用数学会, 2014年09月04日-2014年09月04日, 政策研究大学院大学 (東京都港区)

(30) 齋藤歩, 伊東拓, 松井伸之, 神谷淳: RBF 型関数の違いが拡張境界節点法の性能に与える影響, 日本応用数学会, 2014年09月03日-2014年09月03日, 政策研究大学院大学 (東京都港区)

〔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

### (2) 研究分担者

三浦 毅 (MIURA, Takeshi)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号: 90333989

齋藤 歩 (SAITOH, Ayumu)

山形大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 20400533