

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：32663

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04200

研究課題名（和文）ハイパーサーミア・シミュレーションに向けた大規模並列連成計算

研究課題名（英文）Large-scale parallel coupled calculation for hyperthermia simulation

研究代表者

河合 浩志（Hiroshi, Kawai）

東洋大学・総合情報学部・教授

研究者番号：00616443

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）：電磁界-熱伝導連成解析手法の構築に関しては、電磁界-熱伝導の双方向連成解析フレームワークを構築し、動作確認の結果問題なく動くことが解った。ただし、人体の熱伝導の非線形性をどこまで現実のものに近づけるかという課題が残された。  
辺要素有限要素法に対するPUFEMの導入に関しては、電磁界問題に適用するための準備として波動音響問題に対するPUFEMを提案し、構築した。精度検証の結果、構築したコードは適切に動作していることがわかった。現在辺要素形状関数に対するPUFEM構成を検討中であるが、必要となる節点配置が四面体要素に対して非対称となることが判明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電磁界-熱伝導の高速連成計算は計算科学上の課題としてもっとも重要なトピックのひとつとみなされており、本研究課題の遂行により、研究のが定度進展し、当該分野に対して貢献できた。また、辺要素有限要素法に対するPUFEMは本分野における未解決課題となっていたが、適用に向けてある程度の道筋を立てることができた。現在日本の高齢化社会において、癌温熱療法の高高度化は社会的課題であり、電磁界・超音波収束それぞれにおいて、治療の事前予測が可能であることが判明し、ハイパーサーミアを用いた癌温熱療法が患部に対する高収束化の可能性により、治療高度に向けた一歩を本研究により進めることができた。

研究成果の概要（英文）：Regarding the construction of an electromagnetic field-thermal conduction coupled analysis method, we constructed a two-way coupled electromagnetic field-thermal conduction analysis framework, and as a result of operation confirmation, it was found that it works without problems. However, the issue remained as to how closely the nonlinearity of heat conduction in the human body could be brought to reality.  
Regarding the introduction of PUFEM to the edge element finite element method, we proposed and constructed PUFEM for wave-acoustic problems in preparation for application to electromagnetic field problems. As a result of accuracy verification, it was found that the constructed code was working properly. We are currently considering the PUFEM configuration for the edge element shape function, but it has been found that the required node arrangement is asymmetric with respect to the tetrahedral element.

研究分野：計算科学

キーワード：高周波電磁界解析 連成解析 温熱療法シミュレーション 大規模計算 領域分割法 PUFEM

### 1. 研究開始当初の背景

癌温熱療法（ハイパーサーミア）は、マイクロ波の電磁界、または MHz 帯域の超音波による熱効果により病巣部を 42.5～43℃に加温する治療法である。このような低侵襲な治療法は、外科的手術と投薬を中心とする癌治療の補助的役割以外にも、体力的に手術が難しい患者への有効な選択肢となり得ることから、高齢化が急速に進む我が国において極めて重要な技術である。より負担の低い温熱治療の実現のために、例えば生体材料の分野で、鉄やセラミクス等の微小球を用いた温熱部分の局所化などが研究されているが、患者ごとに病態が異なる中で、効果の定量的な予測が大きな課題となっている。

近年、そのような課題に対し、医工連携的研究の一環として、数値シミュレーションを用いたハイパーサーミアの温熱効果の予測が行われてきている。しかし、既存研究の多くでは、数理的、または計算量的な制限により、円柱形状の筋肉等価ファントム等の簡易モデルを用いるため、個々の患者に対応した詳細な計算が実現できずにいた。このような状況において申請者らは、スーパーコンピュータ等を利用した並列計算技術の方向から研究を行い、人体の詳細モデル（NICT 数値人体モデル（TARO））を用いた、有限要素法（Finite Element Method: FEM）による大規模並列電磁界解析を世界に先駆けて行なっているが、超音波解析への展開や血流の考慮、計算コストの低減等、実用化への課題は未だ多い。

超音波解析に関しては、温熱療法で用いる電磁界の周波数の一つである 300MHz の波長が 1m であるのに対し、集束超音波治療で用いる 2MHz の波長は非常に短く 750 $\mu$ m しかない。この波長を解像できる要素で分割した場合、超音波問題の計算規模は膨大となる。このような大規模問題に対して、必要な精度を担保しつつ要素数を削減する手法開発の試みは、炭素繊維プラスチック等、複合材料のマルチスケール解析分野で隆盛している。しかし、電磁界および超音波について大きく問題の性質が異なることと、対象となる方程式そのものの複雑さから、これらの問題に他分野の既存手法を導入することが難しく、現状では学術的研究はほとんど行われていない。ただし、前述の要素数削減が可能になったとしても、血管等の体内形状の複雑さを考えると、それでもなお大規模並列計算が必要となる上、血流による熱の移流等の影響を考慮すると、電磁界・超音波を含む複数の物理現象間の相互作用を考慮したマルチフィジックス解析が不可欠となる。この研究は主に、流体と構造物との相互作用を考慮する必要がある航空工学などの分野で近年急速に隆盛しているが、電磁界や超音波などの分野での研究はまだ非常に少ないため、基本的な数理的扱いが議論されていない。

以上の社会的・学術的背景により、本研究課題は以下の学術的問いを提起する。

[1]複雑かつ大規模なマルチフィジックス問題を統一的に取扱う数値解析フレームワークをいかに構築するか

[2]電磁界や超音波など双曲型問題に対する高精度かつ高速な数値解析手法をどのように創出するか

### 2. 研究の目的

本研究の目的を、以下の(a), (b)のように位置付ける。

(a)問い[1]に対して、電磁界、超音波、熱伝導解析向けの領域分割型並列ライブラリと Coupler の開発

(b)問い[2]に対して、Partition-of-Unity FEM (PUFEM) による高精度かつ高速な電磁界および超音波の数値解析手法の提案

本研究の目的(a)では、背景で前述した通り、音響解析および高周波電磁界解析をベースとしたマルチフィジックス解析自体が発展途上の分野であり、汎用な解析が可能な計算ソフトウェアやライブラリ開発の試みはほとんど例がない。その上で、並列解析を実現するという事は国際的にも非常に先進的であるといえ、学術的にも開発プロジェクト的にも独自性のある試みである。目的(b)に関しては、Partition of Unity Finite Element Method (PUFEM) を用い、音響問題の半端長～1 波長を要素内で表現するための三角関数に基づく基底関数を適用することで、波動音響解析において必要となる要素数の大幅削減を実現する。本手法を 3 次元の音響解析および高周波電磁界解析に適用した例は世界的に見てもまだ存在しておらず、ここに一つの数理的な独自性がある。

### 3. 研究の方法

2つの目的(a), (b)を達成するために、以下の実施年度・担当により研究計画を設定する。また、全ての研究項目において、に示した数値人体モデルの胴体部分を切出したモデル、および Reisら (Comp. App. Math. 2015) のモデルを、それぞれ 1.5 億要素程度に分割した高解像度メッシュを数値実験用データとして用いる。

(a) 電磁界、超音波、熱伝導解析向けの領域分割型並列ライブラリと Coupler の開発  
(a-1) 領域分割法ベースの並列ライブラリ開発と各ソルバへの導入 (R2, 河合・武居)

本研究課題の申請者らが参画した、JST CREST の課題「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」(2013-2018) において、電磁界や音響、熱伝導向け領域分割法ライブラリ構築に関する研究を推進した。これらのプロジェクトによりメニーコア向けに研究・開発した多階層領域分割法ライブラリを、既開発の高周波電磁界、音響、熱伝導の各解析コード(ADVENTURE\_FullWave, \_Sound, \_Thermal)に導入し、宮崎大学が所有する Core i7 を搭載する PC クラスタを用いる性能評価において、ストロングスケーリングにより並列化効率を確認する。あわせて、領域間釣合計算に適用する反復法ソルバの種類の違いや、前処理の有無による比較をし、ソルバ構成を最適化・共通化する。

(a-2) 領域が重複するマルチフィジックス問題に対する Coupler 開発 (R3, 河合)

(a-1)にて開発した領域分割型並列計算ライブラリと各現象の並列ソルバーをもとに、独立に領域分割された二つの解析に対する分離型の並列マルチフィジックス(連成)解析の実現を目指す。各物理計算コードは全て領域分割法ライブラリにより実装するため、データ構造が共通であり、並列 Coupler に含まれる解析コード用通信ライブラリを各物理計算コードにリンクすることにより、並列マルチフィジックス計算機能が実現する。

解析の手順は、まず、電磁界または超音波の波動解析を行い、その結果得られる人体内の比吸収率(SAR)より求まる発熱密度を入力条件として、熱伝導解析を実行する。熱伝導解析の温度分布により導電率および密度を更新する双方向連成を行う。温度が低下しなくなるまで、前述の計算手順を繰り返す非線形計算を実施する。

(a-3) AMD アーキテクチャ等メニーコア CPU 向けの最適化 (R4, 河合)

医療現場向けに設置面積・消費電力あたりの計算性能が優れたメニーコア・プロセッサを搭載する WS クラスタを構築する。コア数 64 の AMD アーキテクチャ・メニーコア・プロセッサ、および 192GB のメモリを搭載した計算ノード 3 台とゲートウェイを LAN 接続する。

次に、並列マルチフィジックス計算コードの、メニーコア搭載 WS クラスタ上での性能評価を実施する。ここでは、マルチフィジックス計算実行時において各物理計算コードおよび並列 Coupler のロードバランスを確認しながら、それぞれの解析における計算時間、メモリ使用量、通信量の最適化を行い、もっとも効率よく解析が可能となるようにチューニングする。目標とする性能は、1.5 億要素の並列マルチフィジックス計算が臨床利用に耐え得る計算時間である十数時間~1 日程度で完了することとする。

(b) PUFEM の並列数値解析コードへの導入 (R3, R4, 武居+研究協力者)

本研究課題が対象とする高周波波動現象を高精度に再現するためには、多量の要素が必要となる。例えば癌患部を含む胴体周り 0.125 m<sup>3</sup>程度の空間において、HIFU で用いる標準的な周波数である 2MHz の計算に必要な要素数は約 3,000 億であり、一次要素の場合、次元数約 500 億の巨大な線形方程式を解く必要がある。この問題に対し、波の再現性を損なわずに計算量を低減する方法として、次数の高い基底関数を要素に使用する“要素の高次化”が有効である。近年では、B-スプライン関数等を用いる Isogeometric 解析が注目されているが、本研究課題では、目的(a)における領域分割型並列化の利点を損なわないという点と、従来の有限要素に任意の関数(エンリッチ関数)を付加できるその柔軟性から、Partition-of-Unity FEM (PUFEM)に着目し、これを(b-1)において開発した並列音響解析コードに導入する。PUFEM のエンリッチ関数として、出力周波数周辺の正弦関数を使用し要素の空間的表現能力を向上させることで、高周波帯域のモデリングにおいて膨大となる必要要素数を、PUFEM に基づく関数要素により 1/1,000~1/4,000 程度まで圧縮出来る。また、提案手法の精度検証および、精度・計算コスト両面からみたエンリッチ関数の適切な設定(周波数および基底数)を、国際的に広く利用されているベンチマーク問題(Code\_Aster, AHLV100)を用いて議論する。

超音波解析への PUFEM 導入後、同じく(b-1)において開発した並列高周波電磁界解析コードへの導入を検討する。超音波解析では節点要素を使用するが、電磁界解析では、要素辺上に未知数を配置する辺要素を用いるため、超音波解析で提案した手法をこれに拡張するための数理的一般化を行った上で、辺要素形状関数に対して PUFEM を適用するフィージビリティ・スタディを実施する。電磁界問題の精度検証および基底関数の決定には、国際計算電磁気学会による検証モデルであるベンチマーク問題 (TEAM Workshop #29) を用いる。

#### 4. 研究成果

目的(a)に関しては、電磁界-熱伝導の双方向連成解析フレームワークを構築し、動作確認の結果問題なく動くことが解った。ただし、人体の熱伝導の非線形性をどこまで現実のものに近づけるかという課題が残された。また、精度検証は TEAM Workshop Problem #29 など非常に限られた問題のみにとどまったため、実験値との比較をはじめとするバリデーションも今後実施することとしている。

目的(b)に関しては、電磁界問題に適用するための準備として波動音響問題に対する PUFEM を提案し、構築した。精度検証の結果、構築したコードは適切に動作していることがわかった。現在辺要素形状関数に対する PUFEM 構成を検討中であるが、必要となる節点配置が四面体要素に対して非対称となることが判明しており、今後節点配置を対象化する方向によりさらに検討を進めることで、辺要素有限要素法に対する PUFEM を実現する。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計29件（うち査読付論文 14件 / うち国際共著 15件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 後藤聡太, 金子栄樹, 武居周, 吉村忍	4. 巻 2022
2. 論文標題 Non-Intrusive Polynomial Chaos法を用いた効率的な不確かさ定量化法	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本計算工学会論文集	6. 最初と最後の頁 20220013
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11421/jscses.2022.20220013	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 瀧澤哲, 工藤彰洋, 武居周	4. 巻 14-2
2. 論文標題 移動音の移動方向知覚に関する研究 - 適応法による検討 -	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本シミュレーション学会論文誌	6. 最初と最後の頁 pp. 71-77
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11308/tjsst.14.71	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 Kento Ohnaka and Amane Takei	4. 巻 N/A
2. 論文標題 High-Frequency Electromagnetic Field Analysis in Microwave Oven by Parallel Finite Element Method	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of The 41th JSST Annual Conference: International Conference on Simulation Technology, Fukuoka, Japan, Aug. 31- Sep. 2	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Shin-ichiro Sugimoto, Amane Takei and Masao Ogino	4. 巻 N/A
2. 論文標題 FE Analysis of Numerical Human Body Model with 100 Million DOFs in Electromagnetic Field - Heat Conduction Coupled Problem	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of The 41th JSST Annual Conference: International Conference on Simulation Technology, Fukuoka, Japan, Aug. 31- Sep. 2	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Amane Takei	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Development of Parallel Microwave analysis software: ADVENTURE_Fullwave	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of The 41th JSST Annual Conference: International Conference on Simulation Technology, Fukuoka, Japan, Aug. 31- Sep. 2	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Hiroshi Kawai	4. 巻 N/A
2. 論文標題 How to make your own mesh generator using ADVENTURE AutoMESH ?	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of The 41th JSST Annual Conference: International Conference on Simulation Technology, Fukuoka, Japan, Aug. 31- Sep. 2	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 M. Nomura, A. Takei	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Accurate and Fast Electrostatic Analysis Using Mesh Smoothing and Geometric Multi-Grid for Numerical Human Body Model	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of IEEE CEFC2022, Denver, Colorado, Nov. 24-26	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CEFC55061.2022.9940714	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 Amane Takei, Nanako Mizoguchi, Kento Ohnaka, Makoto Sakamoto	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Parallel full-wave electromagnetic field analysis based on hierarchical domain decomposition method	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of ICAROB2023, Oita, Japan, Feb. 9-12	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 該当する

1. 著者名 Amane Takei	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Development of Huge-Scale Microwave analysis software: ADVENTURE_Fullwave	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of 15th World Congress on Computational Method(WCCM), Yokohama, Japan, Jul. 31-Aug. 5	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 該当する

1. 著者名 A M M Mukaddes, Kanta Purkayasta, Ryuji Shioya, Amane Takei	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Effect of Metabolic Heat Generation, Blood Perfusion and Environment Temperature on the Body Temperature-an Approach of Finite Element Simulation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of 15th World Congress on Computational Method(WCCM), Yokohama, Japan, Jul. 31-Aug. 5	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 該当する

1. 著者名 Masamune Nomura, Amane Takei	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Fast Electrostatic Field Analysis with Unstructured Numerical Human Body Model Using Parallel Geometric Multigrid Method	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of 15th World Congress on Computational Method(WCCM), Yokohama, Japan, Jul. 31-Aug. 5	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 該当する

1. 著者名 Sota Goto, Amane Takei, Shigeki Kaneko, Shinobu Yoshimura	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Uncertainty Quantification Using Non-Intrusive Polynomial Chaos Method for Large-Scale Electromagnetic Wave Analysis	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of 15th World Congress on Computational Method(WCCM), Yokohama, Japan, Jul. 31-Aug. 5	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 該当する

1. 著者名 Shin-ichiro Sugimoto, Amane Takei, Masao Ogino	4. 巻 N/A
2. 論文標題 FE Analysis of Numerical Human Body Model with 100 Million DOFs in High-Frequency Electromagnetic Field - Heat Conduction Coupled Problem	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of 15th World Congress on Computational Method(WCCM), Yokohama, Japan, Jul. 31-Aug. 5	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 該当する

1. 著者名 西嶋幹太, 後藤聡太, 村山敏夫, 武居周	4. 巻 N/A
2. 論文標題 領域分割型並列有限要素法に基づく電子回路基板の電磁界解析に関する基礎検討	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電子情報通信学会エレクトロニクスソサエティ, エレクトロニクスシミュレーション研究会 (信学技報), EST研R4第4回, EST	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 該当する

1. 著者名 溝口奈七子, 武居周	4. 巻 N/A
2. 論文標題 領域分割型並列有限要素法に基づく人体fullwave電磁界解析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電子情報通信学会エレクトロニクスソサエティ, エレクトロニクスシミュレーション研究会 (信学技報), EST研R4第4回, EST	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 該当する

1. 著者名 野村政宗, 武居周	4. 巻 N/A
2. 論文標題 高精度と高速性を両立した人体内静電界解析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電子情報通信学会エレクトロニクスソサエティ, エレクトロニクスシミュレーション研究会 (信学技報), EST研R4第3回, EST	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 該当する

1. 著者名 武居周	4. 巻 N/A
2. 論文標題 高周波電磁解析へのPUFEM導入についての基礎検討	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電子情報通信学会エレクトロニクスソサエティ, エレクトロニクスシミュレーション研究会(信学技報), EST研R4第3回, EST	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 該当する

1. 著者名 武居周, 野村政宗	4. 巻 N/A
2. 論文標題 高精度と高速性を両立する幾何マルチグリッド法に基づく人体内静電界解析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 第27回計算工学講演会論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 該当する

1. 著者名 杉本振一郎, 武居周, 萩野正雄	4. 巻 N/A
2. 論文標題 電磁界-熱伝導連成問題における数値人体モデルの有限要素解析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 第27回計算工学講演会論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 該当する

1. 著者名 後藤聡太, 武居周, 金子栄樹, 吉村忍	4. 巻 N/A
2. 論文標題 大規模高周波電磁波問題に対する効率的な不確かさ定量化法	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 第27回計算工学講演会論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 該当する



1. 著者名 武居周, 野村政宗	4. 巻 N/A
2. 論文標題 並列幾何マルチグリッド法に基づく高速・高精度数値人体解析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 第34回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム (SEAD34)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 該当する

1. 著者名 大中健登, 武居周	4. 巻 N/A
2. 論文標題 高周波電磁界解析コード: ADVENTURE_FullWave による電子レンジ内環境解析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 第34回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム (SEAD34)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 該当する

1. 著者名 A. Takei, H. Kawai, R. Shioya and T. Yamada	4. 巻 8
2. 論文標題 High-frequency electromagnetic field analysis using pseudo-quadruple precision in subdomain local solver	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Simulation in Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 194-210
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.15748/jasse.8.194	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 H. Tarao, M. Akutagawa, T. Emoto, A. Takei, H. Yumoto, T. Tominaga, T. Ikehara, Y. Kinouchi	4. 巻 42
2. 論文標題 Evaluation of Temperature Increase From Joule Heat in Numerical Tooth Model by Applying 500 kHz Current for Apical Periodontitis Treatment -Effect of Applied Voltage and Tooth Conductivity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Bioelectromagnetics	6. 最初と最後の頁 224-237
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Sota Goto, Amane Takei, Shigeki Kaneko and Shinobu Yoshimura	4. 巻 -
2. 論文標題 Heat Transfer Analysis with Uncertainty Using Non-Statistical Uncertainty Quantification Method and Parallelized Heat Transfer Analysis Tool	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of The 40th JSST Annual Conference: International Conference on Simulation Technology Kyoto, Japan, Sep. 1-3, 2021.	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Masamune Nomura and Amane Takei	4. 巻 -
2. 論文標題 Accurate and Fast Electrostatic Field Analysis with Unstructured Numerical Human Body Model Using Parallel Geometric Multi-Grid Method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of The 40th JSST Annual Conference: International Conference on Simulation Technology, Kyoto, Japan, Sep. 1-3, 2021	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Amane Takei	4. 巻 -
2. 論文標題 Development of Huge-Scale Microwave analysis code: ADVENTURE_Fullwave	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of The 40th JSST Annual Conference: International Conference on Simulation Technology, Kyoto, Japan, Sep. 1-3, 2021	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 A. Takei, S. Nakamura, K. Yodo and A. Miyoshi	4. 巻 -
2. 論文標題 High-accuracy electromagnetic field simulation based on voxel mesh smoothing	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceeding of The Compumag2021	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 M. Nomura, A. Takei	4. 巻 -
2. 論文標題 Geometric Multi-Grid Method for Accurate and Fast Electrostatic Analysis with Unstructured Numerical Human Body Model	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceeding of The Compumag2021	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 武居周
2. 発表標題 大規模並列マイクロ波解析
3. 学会等名 日本機械学会 第35回計算力学講演会 (CMD2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 後藤聡太, 武居周, 金子栄樹, 吉村忍
2. 発表標題 ADVENTURE_Thermalコードと非統計学的アプローチによる不確かさ定量化
3. 学会等名 第26回計算工学講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 武居周, 野村政宗
2. 発表標題 非構造幾何マルチグリッド法に基づく高精度人体内電界計算
3. 学会等名 第26回計算工学講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉本振一郎, 武居周, 荻野正雄
2. 発表標題 数値人体モデルの電磁界-熱伝導連成解析の検討
3. 学会等名 第26回計算工学講演会論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野村政宗, 武居周
2. 発表標題 マーチングキューブ法を応用したメッシュスムージングによる人体内高精度電界解析
3. 学会等名 第33回 「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム (SEAD33)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 A. Takei, S. Nakamura, K. Yodo and A. Miyoshi
2. 発表標題 High-accuracy electromagnetic field simulation based on voxel mesh smoothing
3. 学会等名 Compumag2021 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Nomura, A. Takei
2. 発表標題 Geometric Multi-Grid Method for Accurate and Fast Electrostatic Analysis with Unstructured Numerical Human Body Model
3. 学会等名 Compumag2021 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Amane Takei
2. 発表標題 Development of Huge-Scale Microwave analysis code: ADVENTURE_Fullwave
3. 学会等名 The 40th JSST Annual Conference: International Conference on Simulation Technology (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masamune Nomura and Amane Takei
2. 発表標題 Accurate and Fast Electrostatic Field Analysis with Unstructured Numerical Human Body Model Using Parallel Geometric Multi-Grid Method
3. 学会等名 The 40th JSST Annual Conference: International Conference on Simulation Technology (国際学会)
4. 発表年 2021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
研究分担者	武居 周  (Takei Amane)  (40598348)	宮崎大学・工学部・教授    (17601)	

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
---------	---------