

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：63902

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2021

課題番号：16K17847

研究課題名(和文)多階層シミュレーションモデルの開発とプラズマ階層横断現象の探求

研究課題名(英文)Development of multi-hierarchy simulation models and investigation of plasma cross-hierarchy phenomena

研究代表者

宇佐見 俊介 (Usami, Shunsuke)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：80413996

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：マクロ階層とミクロ階層を無矛盾に解く多階層シミュレーションモデルの開発、改良を、実空間分割型とパラメータ組み込み型の2種に分けて行った。同時に、多階層モデルの基盤を支えるため、磁気リコネクション下流の物理を詳しく解明した。実空間分割型では、階層の自動切り替え、中間階層の挿入、マクロ階層手法の拡張などの改良を行った。パラメータ組み込み型では、粒子モデルを用いてドリフトキンク不安定性等の運動論効果をモデリングした。一方では球状トカマク合体の装置内全系に近い粒子シミュレーションを行い、グローバルなプラズマの振る舞いを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多階層シミュレーションは、気象学、宇宙天気予報、医学、自動車設計などの工学についても有効な手段である。開発・改良された多階層モデルには様々な分野への適用につながる汎用的な側面が多い。また、多階層モデルを支える基礎として、磁気リコネクションに関する知見を積み上げた。磁気リコネクションは様々なプラズマで起こるエネルギー解放過程であるため、それら多くの分野の研究が大きく前進する。特に「非熱平衡状態にマクスウェル分布と酷似した速度分布が形成される」という成果は、既存の知見へ影響が極めて大きいものである。

研究成果の概要(英文)：We have developed and improved multi-hierarchy simulation models self-consistently solving macroscopic and microscopic hierarchies, which are divided into two types, i.e., the real space division method and the parameter renormalization method. In addition, for the basis of the multi-hierarchy models, we have clarified detailed physics in the downstream of magnetic reconnection. For the real space division method, we have employed the domain dynamic conversion, inserted the mesoscopic hierarchy, and extended the macroscopic hierarchy method. For the parameter renormalization method, we have modeled kinetic effects of instabilities such as the drift kink instability, by using a particle model. On the other hand, we have performed particle simulations in almost the entire system which mimics plasma merging in a spherical tokamak device and demonstrated global plasma processes.

研究分野：プラズマ物理学

キーワード：多階層 磁気リコネクション 不安定性 球状トカマク

## 1. 研究開始当初の背景

プラズマ中には、プラズマを構成する電子・イオン1つ1つの運動に依存したマイクロな過程から、領域全体にまたがるマクロな過程まで、様々な時間・空間スケールの過程が混在している。電子運動、イオン運動、領域全体の挙動など、それらの振る舞いを特徴付ける大きさや時間などのスケールが著しく異なっている場合、そこに階層が存在すると表現される。多くの場合、それぞれの階層における現象は互いに絡み合いながら全体の現象を作っており、これを多階層現象（階層横断現象）と呼ぶ。多階層現象においては、個々の単純な和が全体を表さない。そのため個別の階層だけをどれだけ調べても全体の振る舞いを理解することはできない。

磁場に閉じ込められた高温プラズマを例に挙げると、1mサイズの装置に対して、電子1つ1つの運動は、0.01mm という非常に小さいスケールである。このようなマイクロなスケールの運動が装置全体のプラズマ閉じ込め性能に影響を与えることが分かっている。一方、装置全体におよぶプラズマの構造がマイクロスケールの挙動に大きな影響を与えてもいる。つまり、互いが互いの原因であり結果でもあると言える。また、宇宙に目を向ければ、太陽フレア、地球磁気圏のオーロラ現象などが例として挙げられ、プラズマは多階層現象の宝庫と言える。

プラズマ多階層現象を実験、観測により探求することは極めて難しく、計算機シミュレーションによる研究が期待されている。しかし、これまで多くの場合、調べたい階層あるいは物理ごとに、異なるモデルが使われてきた。たとえば、グローバルな領域における不安定性などの現象を調べたい場合は主に磁気流体(MHD)モデルが、マイクロなスケールの運動を見る場合は粒子(PIC)モデルが使われて、それぞれの研究はめざましく進展している。一方、異なる階層・物理がどのように相互作用しているかという課題については、ほとんど未解決のままである。

我々は階層ごとに計算手法が異なる多階層モデルの開発を進めて、典型的な多階層現象である、磁気リコネクションに適用することに成功した。平成26年には、この多階層モデルによりプラズマのマクロな振る舞いがリコネクションのマイクロ物理に及ぼす影響について調べ、世界で最初の成果を報告している。

## 2. 研究の目的

核融合などで重要な役割を果たす磁気リコネクション、圧力駆動型不安定性などに焦点を当てて、その階層横断過程にアプローチする。磁気リコネクションでは、電気抵抗起源となるマイクロな効果、グローバルな3次元構造、それらの相互作用という重要問題にアプローチし、不安定性については、マイクロの物理がマクロのダイナミクスにどのような影響を及ぼすのかというテーマに取り組むため、マクロとマイクロの物理を矛盾無く結びつけて解く多階層シミュレーションモデルの開発・改良を行う。また同時に、多階層シミュレーションモデルを支え、その基礎となるため、磁気リコネクション下流の詳細な物理を解明する。多階層モデル開発自体も目的の一部であり、開発した多階層モデルにおけるノウハウ、知見をプラズマ分野のみにとどまらず、気象学、工学など他分野の研究推進に役立てることを目指す。

## 3. 研究の方法

(1) マクロ階層の物理とマイクロ階層の物理を自己無撞着に結び付けて同時に解く多階層シミュレーション手法の開発・改良を行う。多階層モデルは、図1の概念図に示したように、実空間分割型とパラメータ繰り込み型の2種に大別される。

①実空間分割型：シミュレーションの実空間を複数の領域に分割して、領域ごとに異なる手法を用いる。マイクロ階層における第一原理に基づいた物理を、何の条件も付けずにそのままマクロ階層に取り入れる

ことが可能である。この研究課題では、マクロ階層のダイナミクスは磁気流体(MHD)シミュレーションで、マイクロ階層の物理は粒子(PIC)シミュレーションで解いて、両者の間には有限の幅を持つインターフェイス領域を設け、そこで2つの階層のデータをやりとりする多階層モデルをベースにして、磁気リコネクションに適用するために、そのモデルに様々な拡張・改良を行う。

②パラメータ繰り込み型：粒子シミュレーションのような第一原理計算から得られた結果を、何らかの条件や仮定の下でモデリングして、グローバルな(流体の)基礎方程式系に組み込む。本研究では、粒子シミュレーションの結果から、ドリフトキンク不安定性やレイリーテイラー不安定性などの現象に合う適切なモデリングを見出す。

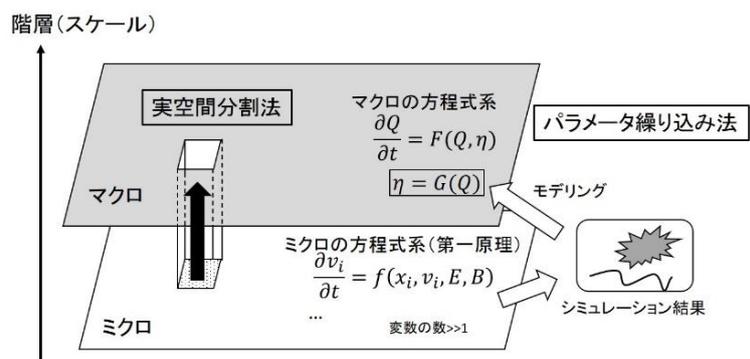


図1: 実空間分割型多階層モデルとパラメータ繰り込み型多階層モデルの概念図。

(2) 上記の多階層モデルの基盤を支えるため、および、実空間分割型多階層モデルにおいて、磁

気リコネクション下流部分でより正しく連結を行うため、磁気リコネクション下流の物理を詳しく探究することをめざし、第一原理に最も近い手法である粒子シミュレーションを用いる。この粒子コードとして、実空間分割型の多階層モデルで採用しているものを採用する。

(3) 球状トカマク装置のマイクロからマクロまで、原理的には全てのプラズマ物理を含んだ全系に近いグローバルな粒子シミュレーションモデルを行う。

#### 4. 研究成果

本研究課題によって得られた成果を、(1)実空間分割型多階層シミュレーション、(2)パラメータ繰り込み型多階層シミュレーション、(3)全系に近い粒子シミュレーション、(4)磁気リコネクション下流の物理 の4項目に分けて記述する。

(1) 磁気リコネクションの階層横断現象研究のため、実空間分割型の多階層シミュレーションモデルを開発し、様々な拡張を行った。

① このモデルでは、マクロ階層（磁気流体(MHD)シミュレーションで解く）とマイクロ階層（粒子(PIC)シミュレーションで解く）を接続するためにインターフェイス領域を設けている。これまで定性的には分かっていたインターフェイス領域の役割を、定量的に調べた。マイクロ階層の粒子シミュレーションでは物理的に正しく記述される波が、マクロ階層の MHD シミュレーションでは非物理的なノイズと扱われる場合、波数と振動数の関係を解析して非物理的ノイズを減衰させる効果を明確にした。その結果、インターフェイス領域の適切な幅やそこでの情報のやりとりの手法を定量的に評価することに成功した。一方では、インターフェイス領域を伝播することが可能な波の限界波長を明らかにした。

② 磁気リコネクション下流の階層連結を行うため、MHD 領域、クーロン衝突がある PIC 領域、クーロン衝突がない PIC 領域（通常マイクロ階層と同じ）を連結させた三階層連結モデルを開発し、改良を続けている。これまでその検証として、磁気リコネクションの結果発生するアウトフローを模擬して、非マクスウェル分布のプラズマフローの伝播をシミュレートしていた。今回、その三階層連結モデルの精密な検証を行った。図2の上図は、三階層連結モデルの模式図を示し、中図および下図は、磁場に平行、垂直な粒子速度分布関数の空間プロファイルを示す。このシミュレーションでは、右向きのプラズマフローを PIC 領域の左端から人工的に発生させている。そのフローは、クーロン衝突あり PIC 領域を経て MHD 領域へ伝播していく。速度分布プロファイルを見ると、まず PIC 領域から2つのピークを持つ、明らかにマクスウェル分布とは異なる速度分布を持つフローが存在し、それがクーロン衝突あり PIC 領域を通過する間に、その速度分布は徐々に山型構造へと変化し、インターフェイス領域近くではほぼマクスウェル分布に緩和していることが分かる。この検証によって、三階層連結モデルで非マクスウェル分布のプラズマフローがスムーズに伝播したことを精密に確かめることができた。

③ 実際の物理系を考えると、磁気リコネクションが領域内において、いつでも発生するかは自明ではないので、これまで固定してきたマクロ階層、マイクロ階層の領域を時間ともに動かす必要が生じると考えられる。そのような多階層シミュレーションを目指して、初期には全領域をマクロ階層として MHD シミュレーションで解き、磁気リコネクションの発生が見込まれた時、その周辺領域をマイクロ階層、すなわち PIC シミュレーションで解く領域に切り替える手法を構築した。磁気リコネクションの発生が見込まれる条件を、「電流層の厚み（半値幅）がイオンの慣性長、イオンのジャイロ半径のいずれかを下回ること」と設定して上記の手法を取り込んだ多階層シミュレーションを実施した。その結果、磁気リコネクションが物理的に正しく駆動されていることを示した。

④ 磁気リコネクション下流領域において、本質的に重要な物理過程は落とさずに、かつ物理的により正しく階層を連結することを目指して、拡張 MHD 手法と PIC 手法を連結する新しい多階層モデルを1つの選択肢として、その開発に取り組んだ。その新モデル発展の一環として、二流体効果である Hall 項を取り入れた Hall MHD 手法と PIC 手法を連結し、線形な波が伝播すること

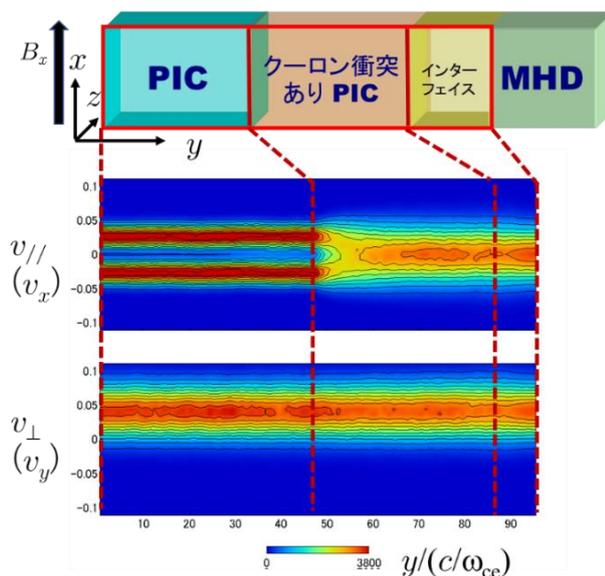


図2: 三階層連結モデルを伝播するプラズマフロー。上図: モデルの模式図。中図: 磁場に平行な粒子速度の分布。下図: 磁場に垂直な粒子速度の分布

で検証を行うことに成功した。

(2)パラメータ繰り込み型の多階層シミュレーションモデルの開発を行った。具体的なプラズマ多階層現象として、磁気リコネクションのトリガーとしても知られているドリフトキンク不安定性と、中性流体にも共通する圧力駆動型不安定性の1つ、レイリーテイラー不安定性を採り上げた。上述の実空間分割型モデルに組み込まれている粒子コードの境界条件、初期条件などを変更することで、様々な条件下でこれらの現象の粒子シミュレーション・ランを多数行った。その結果得られたデータを基にして運動論効果を調べて、MHDシミュレーションに取り込めるような形にモデル化を行った。特に、ドリフトキンク不安定性については、モデル化した運動論効果を電気抵抗としてMHD方程式系に取り込み、地球磁気圏プラズマを扱うMHDシミュレーションを実施するところまで進めることができた。

(3)最近のスーパーコンピュータの発展・計算技術の進展にともない、研究開始当初は想定することすらできなかった磁気リコネクション全系に近い粒子シミュレーションを、条件によっては行うことも可能になってきた。そこで多階層シミュレーションモデルの開発を行う一方、図3のような、球状トカマク装置を、2次元的ではあるが模擬した粒子モデルを構築し、2つの球状トカマクプラズマが磁気リコネクションを通じて合体するシミュレーションを実施した。図4に、合体前から合体完了に至るまでの様々な時刻におけるイオンの温度プロファイルを表した。プラズマ加熱は磁気リコネクション過程によるものだけでなく他の加熱過程も働いていること、加熱プロセスは装置全体スケールにおよぶグローバルな過程であること、また、加熱された高温のプラズマは輸送や拡散プロセスを経て装置全体に広がっていくことを解明した。

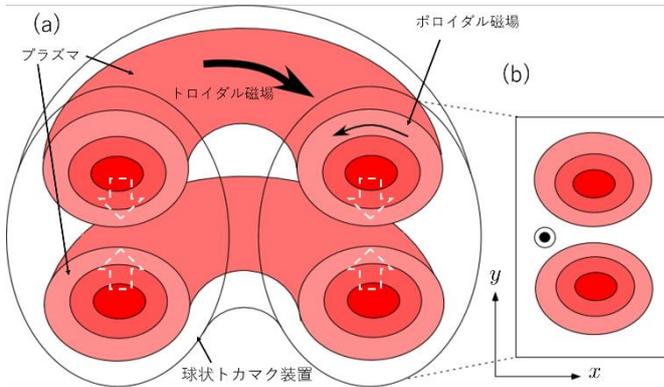


図3: (a)球状トカマク装置におけるプラズマ合体の模式図。  
(b)粒子シミュレーションが担当する領域。

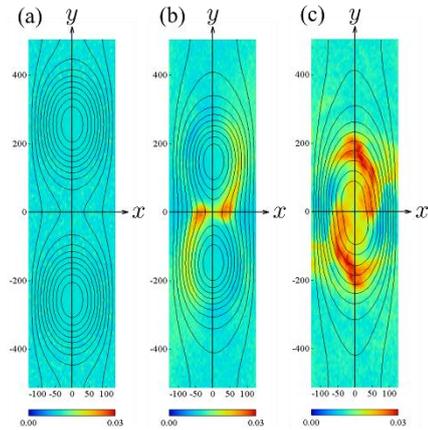


図4: (a)初期、(b)合体中、(c)合体ほぼ完了におけるイオン温度。

(4)磁気リコネクション下流でより適切な階層間連結を行うためには、シミュレーションの技術的な課題に加えて、磁気リコネクションの物理的な課題が予想外に重大であることが分かった。そこで、理論、粒子シミュレーションによって、磁気リコネクション下流におけるプラズマ物理過程を詳しく調べ、以下のような成果を得た。

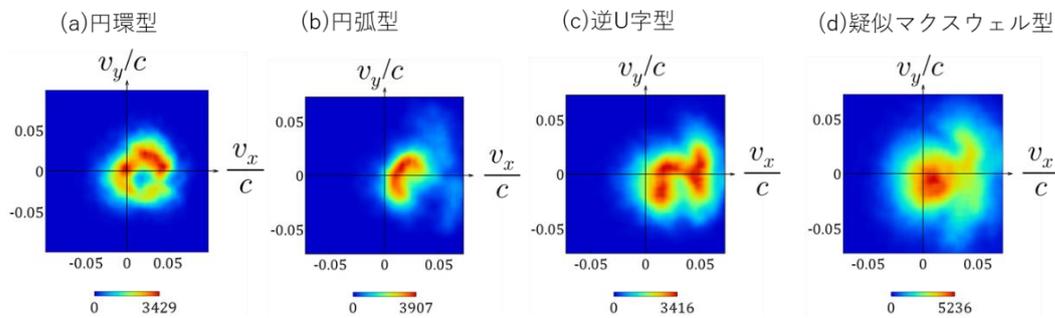


図5: 磁気リコネクションの粒子シミュレーションで見出された様々な速度分布。

①速度分布は、プラズマと電磁場間のエネルギー変換のようなマクロの物理と、粒子1つ1つの振る舞いといったミクロな物理をわかりやすくつなぐ指標と言える。そこで下流領域におけるイオンの速度分布を調べ、図5のように、円環、円弧、逆U字型、疑似マクスウェル型などの特異な形状のイオン速度分布を見出し、それらは、イオンがピックアップに似た振る舞いをするこ

とによって形成されると解明した。この様々な形状の速度分布中で、特に疑似マクスウェル速度分布は重大な波及効果を持つ。系が熱平衡状態ではないにもかかわらず、マクスウェル分布とほぼ区別の付かない速度分布が出現しうることを意味し、実験や観測で得られた既存の知見に大きな影響を与える可能性がある。

②上述した特異な速度分布形成は、マクロな視点で見れば広い意味での加熱に相当することから、磁気リコネクション下流で実効的な加熱機構が働いていることが分かった。同時に、この実効的な加熱機構は、球状トカマクのプラズマ合体実験で報告されているプラズマ加熱の特徴「加熱のエネルギーはリコネクション磁場の2乗に比例する」と「ガイド磁場が強くなると、温度は下がる傾向にある」をシンプルに説明するものである。円環は中心角360度の円弧と見なして円環は円弧の特殊形と位置づけるならば、円弧の半径はリコネクション磁場に依存し、中心角はガイド磁場に依存することを突き止め、実験で報告されている上述の2つの特徴を解明した。球状トカマクのプラズマ合体は、核融合における有力な初期加熱法の候補として注目を集めていることから、これは核融合の発展への貢献につながる成果となった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 5件）

|  |                            |
|--|----------------------------|
| 1. 著者名<br>Usami Shunsuke, Horiuchi Ritoku  | 4. 巻<br>9                  |
| 2. 論文標題<br>Pseudo-Maxwellian Velocity Distribution Formed by the Pickup-like Process in Magnetic Reconnection                            | 5. 発行年<br>2022年            |
| 3. 雑誌名<br>Frontiers in Astronomy and Space Sciences  | 6. 最初と最後の頁<br>846395-1--13 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.3389/fspas.2022.846395   | 査読の有無<br>有                 |
| オープンアクセス<br>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<br>-                  |
| 1. 著者名<br>石黒静児、沼波政倫、宇佐見俊介  | 4. 巻<br>141                |
| 2. 論文標題<br>プラズマシミュレータ雷神とプラズマ・核融合研究の進展  | 5. 発行年<br>2021年            |
| 3. 雑誌名<br>電気学会誌  | 6. 最初と最後の頁<br>642-645      |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1541/ieejjournal.141.642   | 査読の有無<br>無                 |
| オープンアクセス<br>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<br>-                  |
| 1. 著者名<br>S. Usami, R. Horiuchi, H. Ohtani   | 4. 巻<br>14                 |
| 2. 論文標題<br>Horn-Shaped Structure Attached to the Ring-Shaped Ion Velocity Distribution during Magnetic Reconnection with a Guide Field   | 5. 発行年<br>2019年            |
| 3. 雑誌名<br>Plasma and Fusion Research   | 6. 最初と最後の頁<br>3401137-1--7 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1585/pfr.14.3401137  | 査読の有無<br>有                 |
| オープンアクセス<br>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<br>-                  |
| 1. 著者名<br>S. Usami, R. Horiuchi, H. Ohtani, Y. Ono, M. Inomoto, and H. Tanabe  | 4. 巻<br>26                 |
| 2. 論文標題<br>Dependence of the Pickup-Like Ion Effective Heating on the Poloidal and Toroidal Magnetic Fields during Magnetic Reconnection | 5. 発行年<br>2019年            |
| 3. 雑誌名<br>Physics of Plasmas   | 6. 最初と最後の頁<br>102103-1--11 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1063/1.5099423   | 査読の有無<br>有                 |
| オープンアクセス<br>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<br>-                  |

|   |                      |
|---|----------------------|
| 1. 著者名<br>Usami Shunsuke, Horiuchi Ritoku, Ohtani Hiroaki, Den Mitsue                                       | 4. 巻<br>1            |
| 2. 論文標題<br>Improvement of the Multi-Hierarchy Simulation Model Based on the Real-Space Decomposition Method | 5. 発行年<br>2018年      |
| 3. 雑誌名<br>Plasma  | 6. 最初と最後の頁<br>90-104 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3390/plasma1010009   | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>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<br>-            |

|   |                             |
|---|-----------------------------|
| 1. 著者名<br>F. Pucci., S. Usami, H. Ji, X.Guo, R. Horiuchi, S. Okamura, W. Fox, J. Jara-Almonte, M. Yamada, J. Yoo                  | 4. 巻<br>25                  |
| 2. 論文標題<br>Energy transfer and electron energization in collisionless magnetic reconnection for different guide-field intensities | 5. 発行年<br>2018年             |
| 3. 雑誌名<br>Physics of Plasmas  | 6. 最初と最後の頁<br>122111-122111 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1063/1.5050992   | 査読の有無<br>有                  |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する                |

|  |                             |
|--|-----------------------------|
| 1. 著者名<br>Usami Shunsuke, Horiuchi Ritoku, Ohtani Hiroaki  | 4. 巻<br>24                  |
| 2. 論文標題<br>Effective heating of nonadiabatic protons in magnetic reconnection with a guide field | 5. 発行年<br>2017年             |
| 3. 雑誌名<br>Physics of Plasmas   | 6. 最初と最後の頁<br>092101-092101 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1063/1.4997453  | 査読の有無<br>有                  |
| オープンアクセス<br>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<br>-                   |

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Shunsuke Usami, Ritoku Horiuchi, Hiroaki Ohtani, Yasushi Ono, Hiroshi, Tanabe                      | 4. 巻<br>13                    |
| 2. 論文標題<br>Effective Proton Heating through Collisionless Driven Reconnection in the Presence of Guide Field | 5. 発行年<br>2018年               |
| 3. 雑誌名<br>Plasma and Fusion Research   | 6. 最初と最後の頁<br>3401025-3401025 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1585/pfr.13.3401025   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Ritoku HORIUCHI, Toseo MORITAKA and Shunsuke USAMI                         | 4. 巻<br>13                    |
| 2. 論文標題<br>PIC Simulation Study of Merging Processes of Two Spheromak-Like Plasmoids | 5. 発行年<br>2018年               |
| 3. 雑誌名<br>Plasma and Fusion Research   | 6. 最初と最後の頁<br>3403035-3403035 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1585/pfr.13.3403035                                   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

[学会発表] 計35件(うち招待講演 6件/うち国際学会 17件)

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>宇佐見俊介、銭谷誠司、堀内利得、大谷寛明             |
| 2. 発表標題<br>磁気リコネクションにおけるイオンの特異な速度分布と加熱機構の関係 |
| 3. 学会等名<br>第38回プラズマ・核融合学会年会                 |
| 4. 発表年<br>2021年                             |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Shunsuke Usami, Ritoku Horiuchi, Toseo Moritaka, Yasushi Ono                                      |
| 2. 発表標題<br>Studies on ion heating through the merging of spherical tokamaks by means of particle simulations |
| 3. 学会等名<br>The 40th JSST Annual International Conference on Simulation Technology (JSST2021) (国際学会)          |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>宇佐見俊介、堀内利得、大谷寛明              |
| 2. 発表標題<br>磁気リコネクションにおける疑似マクスウェル速度分布の形成 |
| 3. 学会等名<br>プラズマシミュレーションシンポジウム2021       |
| 4. 発表年<br>2021年                         |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Shunsuke Usami, Ritoku Horiuchi, Toseo Moritaka, Yasushi Ono, Michiaki Inomoto, Hiroshi Tanabe          |
| 2. 発表標題<br>Particle Simulation on Merging Processes of Two Spherical Tokamak-Type Plasmoids in a Conducting Vessel |
| 3. 学会等名<br>The 28th IAEA Fusion Energy Conference (FEC2020) (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Shunsuke Usami, Ritoku Horiuchi, Hiroaki Ohtani   |
| 2. 発表標題<br>Non-Maxwellian Velocity Distribution Formed by Pick-Up-Like Behaviors of Protons during Magnetic Reconnection |
| 3. 学会等名<br>The 4th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPs-DPP2020) (招待講演) (国際学会)                               |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>宇佐見俊介、堀内利得、大谷寛明                 |
| 2. 発表標題<br>粒子シミュレーションによる磁気リコネクション加熱機構研究の進展 |
| 3. 学会等名<br>ひので・実験室研究会                      |
| 4. 発表年<br>2020年                            |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>宇佐見俊介、堀内利得、大谷寛明                       |
| 2. 発表標題<br>磁気リコネクションにおける特異な速度分布に関するシミュレーション研究の進展 |
| 3. 学会等名<br>第37回プラズマ・核融合学会年会                      |
| 4. 発表年<br>2020年                                  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Shunsuke Usami, Ritoku Horiuchi, Hiroaki Ohtani   |
| 2. 発表標題<br>Formation of anomalous velocity distribution based on the pickup-like ion motions during magnetic reconnection  |
| 3. 学会等名<br>Hinode-13/IPELS 2019 (the 13-th symposium of the Hinode mission and the 15-th symposium of IPELS) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>宇佐見俊介、堀内利得、大谷寛明                  |
| 2. 発表標題<br>駆動型磁気リコネクション下流で形成されるイオンの異常速度分布関数 |
| 3. 学会等名<br>プラズマシミュレーションポジウム2019             |
| 4. 発表年<br>2019年                             |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Shunsuke Usami, Ritoku Horiuchi, Hiroaki Ohtani  |
| 2. 発表標題<br>Anomalous Velocity Distributions Formed by Pick-Up-Like Protons in Magnetic Reconnection |
| 3. 学会等名<br>61st Annual Meeting of Division of Plasma Physics, American Physical Society (国際学会)      |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Shunsuke Usami, Ritoku Horiuchi, Hiroaki Ohtani   |
| 2. 発表標題<br>Strange Shapes of Ion Velocity Distribution during Magnetic Reconnection in the Presence of a Guide Field |
| 3. 学会等名<br>The 28th International Toki Conference (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>宇佐見俊介、堀内利得、大谷寛明               |
| 2. 発表標題<br>磁気リコネクション下流における水素イオンの異常速度分布形成 |
| 3. 学会等名<br>第36回プラズマ・核融合学会年会              |
| 4. 発表年<br>2019年                          |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>宇佐見俊介、堀内利得、大谷寛明                    |
| 2. 発表標題<br>駆動型磁気リコネクションにおけるピックアップライクなイオン運動と加熱 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会第75回年次大会                     |
| 4. 発表年<br>2020年                               |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Shunsuke Usami, Ritoku Horiuchi, Hiroaki Ohtani   |
| 2. 発表標題<br>Formation of ring-like ion velocity distribution through magnetic reconnection with a guide field |
| 3. 学会等名<br>19th International Congress on Plasma Physics (ICPP2018) (国際学会)                                   |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Shunsuke Usami, Ritoku Horiuchi, Hiroaki Ohtani, Yasushi Ono, M. Inomoto, H. Tanabe |
| 2. 発表標題<br>Particle Simulation Studies on Ion Effective Heating through Merging Plasma         |
| 3. 学会等名<br>The 27th IAEA Fusion Energy Conference (FEC2018) (国際学会)                             |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Shunsuke Usami, Ritoku Horiuchi, Hiroaki Ohtani, and Yasushi Ono                  |
| 2. 発表標題<br>Particle Simulation Studies on Effective Ion Heating during Magnetic Reconnection |
| 3. 学会等名<br>2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS-DPP2018) (招待講演) (国際学会)       |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Shunsuke Usami, Ritoku Horiuchi, Hiroaki Ohtani  |
| 2. 発表標題<br>Extension of the ion effective heating process during magnetic reconnection with guide field                       |
| 3. 学会等名<br>The 27th International Toki Conference & The 13th Asia Pacific Plasma Theory Conference (ITC27 & APPTC2018) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Shunsuke Usami, Ritoku Horiuchi, Hiroaki Ohtani, Yasushi Ono                              |
| 2. 発表標題<br>PIC simulation and extended theory on ion pickup-like heating in guide field reconnection |
| 3. 学会等名<br>The 2018 US-Japan Workshop on Magnetic Reconnection (MR2018) (国際学会)                       |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>宇佐見俊介、堀内利得、大谷寛明                     |
| 2. 発表標題<br>磁気リコネクションにおけるイオン加熱のポロイダル・トロイダル磁場依存性 |
| 3. 学会等名<br>プラズマシミュレーションポジウム2018                |
| 4. 発表年<br>2018年                                |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>宇佐見俊介、堀内利得、大谷寛明                            |
| 2. 発表標題<br>磁気リコネクションにおけるピックアップライクなイオン加熱のシミュレーションと拡張理論 |
| 3. 学会等名<br>宇治リコネクションワークショップ2018 (兼 太陽圏物理研究会 第4回研究集会)  |
| 4. 発表年<br>2018年                                       |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>宇佐見俊介、堀内利得、大谷寛明               |
| 2. 発表標題<br>磁気リコネクションにおけるイオン実効的加熱の磁場成分依存性 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会第74回年次大会                |
| 4. 発表年<br>2019年                          |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Shunsuke Usami, Ritoku Horiuchi, and Hiroaki Ohtani   |
| 2. 発表標題<br>Effective proton heating through magnetic reconnection in the presence of guide field                   |
| 3. 学会等名<br>7th East-Asia School and Workshop on Laboratory, Space and Astrophysical Plasmas (EASW-7) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2017年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Shunsuke Usami, Ritoku Horiuchi, Hiroaki Ohtani, Mitsue Den, and Tomoya Ogawa                              |
| 2. 発表標題<br>Studies on Magnetic Reconnection by Means of Multi-Hierarchy Simulations based on Real-Space Decomposition |
| 3. 学会等名<br>US-Japan Joint Institute for Fusion Theory (JIFT) Workshop on Multiscale Methods in Plasma Physics (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2017年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>宇佐見俊介、堀内利得、大谷寛明                 |
| 2. 発表標題<br>駆動型磁気リコネクションにおける水素イオン実効的加熱機構の探求 |
| 3. 学会等名<br>プラズマシミュレーションポジウム2017            |
| 4. 発表年<br>2017年                            |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>宇佐見俊介、堀内利得、大谷寛明                           |
| 2. 発表標題<br>磁気リコネクション下流におけるイオンリング状速度分布の形成過程           |
| 3. 学会等名<br>宇治リコネクションワークショップ2017 (兼 太陽圏物理研究会 第2回研究集会) |
| 4. 発表年<br>2017年                                      |

|                                       |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>宇佐見俊介、堀内利得、大谷寛明            |
| 2. 発表標題<br>ガイド磁場磁気リコネクションにおけるイオン実効的加熱 |
| 3. 学会等名<br>Plasma Conference 2017     |
| 4. 発表年<br>2017年                       |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Shunsuke Usami, Ritoku Horiuchi, Hiroaki Ohtani, Yasushi Ono, and Hiroshi Tanabe                       |
| 2. 発表標題<br>Effective proton heating through collisionless driven reconnection in the presence of guide field      |
| 3. 学会等名<br>The 26th International Toki Conference & The 11th Asia Plasma and Fusion Association Conference (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2017年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>宇佐見俊介、堀内利得、大谷寛明                                      |
| 2. 発表標題<br>ガイド磁場磁気リコネクションにおけるリング状速度分布の形成 - 水素イオンのピックアップライクな運動 - |
| 3. 学会等名<br>平成29年度ISEE太陽圏宇宙線共同研究集会                               |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>宇佐見俊介、堀内利得、大谷寛明                |
| 2. 発表標題<br>磁気リコネクションにおける水素イオンのリング状速度分布の形成 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会第73回年次大会                 |
| 4. 発表年<br>2018年                           |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Shunsuke Usami, Ritoku Horiuchi, Tomoya Ogawa, Hiroaki Ohtani, and Mitsue Den |
| 2. 発表標題<br>Macro- and microscopic physics of collisionless driven reconnection           |
| 3. 学会等名<br>18th International Congress on Plasma Physics (ICPP2016) (招待講演) (国際学会)        |
| 4. 発表年<br>2016年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>宇佐見俊介、堀内利得、大谷寛明                   |
| 2. 発表標題<br>磁気リコネクション下流におけるイオン加熱機構の粒子シミュレーション |
| 3. 学会等名<br>プラズマシミュレーションポジウム2016              |
| 4. 発表年<br>2016年                              |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>宇佐見俊介、堀内利得、大谷寛明                  |
| 2. 発表標題<br>磁気リコネクションにおけるイオン実効的加熱のシミュレーション研究 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会2016年秋季大会                  |
| 4. 発表年<br>2016年                             |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>宇佐見俊介、堀内利得、大谷寛明                    |
| 2. 発表標題<br>ガイド磁場磁気リコネクションにおけるイオン加熱の粒子シミュレーション |
| 3. 学会等名<br>第33回プラズマ・核融合学会年会                   |
| 4. 発表年<br>2016年                               |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Shunsuke Usami, Ritoku Horiuchi, and Hiroaki Ohtani   |
| 2. 発表標題<br>Studies on proton effective heating in magnetic reconnection by means of particle simulations |
| 3. 学会等名<br>The US-Japan Workshop and School on Magnetic Reconnection (MR2017) (招待講演) (国際学会)              |
| 4. 発表年<br>2017年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Y. Ono, T. Yamada, S. Inoue, M. Inomoto, C. Z. Cheng, M. Gryaznevich, R. Scannell, N. Conway, B. J. Crowley, C. Michael, H. Hara, S. Usami, and R. Horiuchi |
| 2. 発表標題<br>Reconnection Heating Experiments and Simulations for Torus Plasma Merging Startup   |
| 3. 学会等名<br>26th IAEA Fusion Energy Conference (FEC2016) (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2016年  |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

数値実験炉研究プロジェクト  
<http://nsrp.nifs.ac.jp/index.html>  
基礎物理シミュレーション研究系  
<http://fps.nifs.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

|  | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|--|---------------------------|-----------------------|----|

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|