

jh230006

プラズマ学際科学のためのリアル粒子シミュレーションの研究開発と応用

大谷寛明（核融合科学研究所）

概要

宇宙の典型的な物質状態であるプラズマは、地球惑星科学、宇宙科学、核融合科学、材料プロセス工学等で見られ、各分野で多様な現象を引き起こす。プラズマ科学は、膨大な数の荷電粒子の集団から構成される巨視的な系であるプラズマにおいて生じられる多様な複雑現象が研究対象であり、荷電粒子と電磁場のダイナミクスを自己無撞着に解く粒子モデルは強力な研究手法の一つである。本研究は、実験や観測に即したシミュレーションモデルを構築・導入して、シミュレーションを実行する「リアル粒子シミュレーション」コードのための研究・開発を進める。今年度は、コード研究開発で、粒子コードの移植・ベンチマーク、実験に即した状態で模擬するため境界条件開発、核融合炉周辺輸送解析のコード開発を進めた。また、磁気リコネクション現象での速度分布、境界領域プラズマ輸送現象でのイオン加熱、高速粒子による低域混成波とその高調波の波動励起などについて詳細な解析を進めた。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同利用・共同研究を実施している拠点名

東北大学 サイバーサイエンスセンター
名古屋大学 情報基盤センター
京都大学 学術情報メディアセンター

(2) 課題分野

大規模計算科学課題分野

(3) 共同研究分野 (HPCI 資源利用課題のみ)

超大規模数値計算系応用分野

(4) 参加研究者の役割分担

大谷寛明（核融合研）：総括、粒子コード開発・高速化、可視化研究
宇佐見俊介、長谷川裕記、森高外征雄、沼波政倫、樋田美栄子（核融合研）、小谷翼（京大）：粒子コードの開発・高速化、粒子コードによる物理課題研究
堀内利得、石黒静児（核融合研）：問題設定・結果の評価
大野暢亮（兵庫県立大）、川原慎太郎（JAMSTEC）：可視化表現法の研究
臼井英之、三宅洋平（神戸大）、深沢圭一郎（京

大）：並列分散計算の活用支援

三浦英昭（核融合研）、田光江（NICT）、小川智也（北里大）：流体モデルとの比較
片桐孝洋（名大）：TypeI サブシステムでの最適化・実行支援

滝沢寛之（東北大）：A0A-B での最適化・実行支援

2. 研究の目的と意義

プラズマは様々分野で多様な現象を引き起こす。これらの現象は特徴的なスケールで規格化して共通の現象として議論され、学際的な研究が進められている。プラズマは膨大な数の荷電粒子の集団から構成される巨視的な系であり、そこで生じられる多様な複雑現象を扱う科学がプラズマ科学である。プラズマ粒子モデルは、プラズマの構成要素が荷電粒子であることから、電磁場も含めた系として取り扱うモデルであり、荷電粒子と電磁場のダイナミクスを自己無撞着に解くことができるため、プラズマ粒子シミュレーションは粒子運動という微視的なダイナミクス

を追うことができ、粒子-波相互作用や粒子による運動論的效果を正確に解析することができる。しかし、メモリ量や計算速度の制限から、実験装置サイズのような巨視的な系全体を計算することは困難である。更に、ラグランジュ的表現の粒子系とオイラー的表現の場との結合系であるため、計算機科学の観点から最適化や並列化には多くの困難が存在する。他方、核融合装置のプラズマ周辺領域や電離圏プラズマをシミュレーションする場合、粒子間の衝突や電荷交換、イオン再結合などの素過程の物理モデルをプラズマ粒子モデルに組み込む必要がある。しかし、これら素過程は粒子間相互作用であり、そのまま素過程を取り込むのは困難である。また、プラズマ実験や太陽風・地球磁気圏のプラズマを対象とするには境界条件やジオメトリなどの設定もより正確なシミュレーションを実行するためには必要不可欠である。

本研究課題は、実験や観測に即したシミュレーションモデルを構築・導入して、シミュレーションを実行する「リアル粒子シミュレーション」コードのための研究・開発を目的とする。この「リアル」が意味するところは、

- ・イオン・電子質量比を実際の値でシミュレーション

- ・素過程の物理現象を含むシミュレーション
- ・実験や観測など、現実には即した境界条件やジオメトリを含むシミュレーション

を実行することである。そのために、シミュレーションコードそのものの最適化や高速化、並列化に対応したアルゴリズムの研究・開発を進め、同時に、素過程モデルの最適化・高速化・並列化を進める。プラズマ物理における微視的ダイナミクスを研究する対象として、磁気再結合現象や周辺プラズマにおけるプラズマ輸送現象、高速粒子が励起する波動現象、ヘリカル系核融合炉に向けたジャイロ運動論研究を取り上げ、本課題で研究・開発したコードをもとに研究を進める。実際の

プラズマ現象に研究・開発したシミュレーションコードを適用することで、最適化・高速化・並列化の課題を洗い出し、コードの更なる高度化を図る。また、本課題で扱う粒子シミュレーションの粒子数は膨大な数であるため、本質的な過程を見出すのは困難な面もある。可視化情報学者の協力を得て、粒子による運動論的效果などを理解するための効果的な可視化表現の研究を行う。

粒子シミュレーションは運動論的效果や粒子-波相互作用を正確に表現できるため、流体シミュレーションと比較することで、流体モデルの妥当性検証や流体方程式における微視的效果のモデル化研究へ貢献することができる。本課題で扱う磁気再結合現象や周辺プラズマにおけるフィラメント構造、高速粒子による波動励起は宇宙プラズマなどにおいても見られる普遍的な現象及び構造であり、更に、本課題で素過程の物理モデルを含むことから、本課題による成果は天体プラズマやプロセスプラズマなど多くの分野への学際的な展開が期待できる。

3. 当拠点の公募型共同研究として実施した意義
本研究課題の目的であるコードの研究開発には、使用する計算機資源の特性に合わせた最適化や高速化、並列化の実装が必要である。そのため計算機科学分野と計算科学分野の協調的かつ相補的な研究協力体制が必要不可欠である。また、プラズマ科学は大規模シミュレーションを実行する分野のひとつであり、本研究課題において大規模シミュレーション実施も目的であり、超大規模計算機と超大容量ストレージを有する情報基盤を必要とする。名古屋大学情報基盤センター及び京都大学学術情報メディアセンター、東北大学サイバーサイエンスセンターの先導的研究者の協力のもと、幅広い研究分野の研究者を含む研究体制を構築して、コードの研究開発・大規模シミュレーションを実施する。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

該当なし。

5. 今年度の研究成果の詳細

up3bd のコード研究開発について、今年度は、まず、Nanbu 法によるクーロン衝突ルーチンを実装するため、その前段階として、当該ルーチンを用いた1次元粒子コードで計算実績のある PAMCADE コードについて、FLOW Type I 上で実行検証を行った。PAMCADE コードでは、疑似乱数生成ライブラリとして KMATH_RANDOM を用いているが、名古屋大学情報基盤センターの協力により同ライブラリを FLOW Type I にインストールしていただき、これを用いた動作検証を行った。実行結果については問題なかったが、KMATH_RANDOM へのリンクが gfortran に限定されているため、計算速度の面で課題が残っており、今後、衝突・素過程ルーチンの実装を進めていく上で、検討を要することとなった。また、これと同時に、京都大学 Camphor3、東北大学 AOBA-B への up3bd コードの移植作業も進めた。各計算機への最適化や大規模計算の実行は今後行っていく予定であるが、最適化前の小規模な計算では、表 1 に示したように、AOBA-B (AMD EPYC7702) が比較的高い実行効率を示している。これまでの経験上、up3bd コードでは (多くの粒子コードでも同じことが言えるかもしれないが)、キャッシュメモリが大きく、メモリバンド幅が広いほど、計算が高速になる傾向にあるが、今回の結果は、各 CPU 間でのそれら仕様の差が顕れたものと思われる。今後は、並列数の大きな計算も実行し、並列性能の検証も進めていく予定である。

PASMO のコード研究開発について、京都大学 Camphor3、東北大学 AOBA-B への移植作業を進めた。京大情報基盤課スーパーコンピューティング掛のご協力のもと Camphor3 への移植を進め、ジョブ投入スクリプトの書き換え、Makefile のコンパイラの記述及びオプションの書き換えで移植することができた。東

表 1: 初期ベンチマークの結果。システムサイズ 64×64×256、1 セルあたり粒子数 144 個、600 タイムステップ (初期設定、I/O 等含まず) での計測結果。なお、FLOW Type I ではハイブリッド並列 (12 スレッド)、それ以外ではフラット MPI 並列で実行。実行効率比は、演算数と同じであると仮定し、経過時間と各計算機の理論性能をもとに、AOBA-B を 1 として算出。

計算機	使用コア数	経過時間 (s)	実行効率比
FLOW Type I	48	453.513	0.15
Camphor3	32	224.626	0.54
AOBA-B	32	230.267	1.00

北大学サイバーサイエンスセンターのご協力のもと、AOBA-B への移植を進めた。AOCC4.0.0 でのコンパイルではリンクの段階でエラーが発生した。NEC SE の調査で AOCC4.0.0 のバグと思われる事象であることがわかり、AOCC3.2.0 を使用することとなった。なお、2024 年 4 月にバージョンアップした AOCC4.2.0 でもこのバグは解消していない。また、AOCC でコンパイルした実行ファイルでは環境変数による装置番号の指定ができないため、標準入出力の装置番号の指定をソース内で行うようにソース修正を行った。他方、標準入出力にリダイレクションを使う間接実行が可能であることも確認した。Intel oneAPI 2022 (2022.3) では Makefile のコンパイラの記述及びオプションの書き換えで移植することができた。

次に、粒子コードの衝突項の計算ルーチンについて計算時間を名大 FX1000、Camphor3、

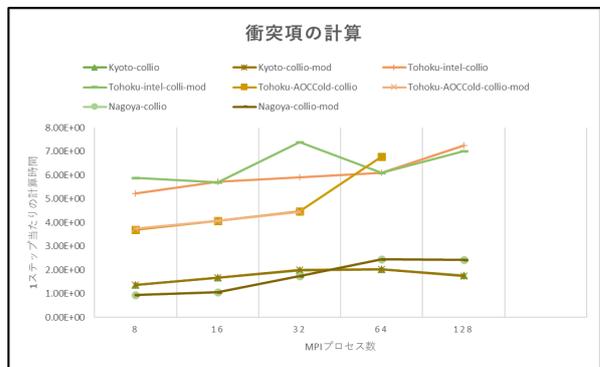


図 1: 衝突項の計算時間。スレッド数は 1 MPI プロセスあたり 6 である。

AOBA-B で計測した (図 1)。1 MPI プロセス当たり 16x16x16 グリッド、1 セル当たり 100 粒子、1 MPI プロセス当たり 6 スレッド並列で、弱スケーリングで調べた。FX1000 及び Camphor3 ではよい弱スケーリングを示していることが分かった。また、衝突項の計算ルーチンの最適化では標準出力が D0 ループの中にあつたためその分離を行ったが、速度向上の効果はなかった。

PIC-G2R のコード研究開発については、球状トラス装置内でのプラズマ合体を、より実際の実験に即した状態で模擬するため、境界条件の改良を行った。多くのパラメータランによる経験則に基づいて、境界壁に課す最適な状況を導きだし、単純な完全導体境界をアップデートした。一方、これまでは装置内領域全体に外部磁場として一定値以上のトロイダル磁場がかかっている「球状トカマク配位」でのプラズマ合体を扱ってきたが、そのような外部トロイダル磁場のない (プラズマ自身が発生させるトロイダル磁場はある) 「スフェロマック配位」におけるプラズマ合体を扱えるように、コードを拡張した。さらに、2 つのプラズマ内のトロイダル磁場が同方向である「同極性合体」、反対方向である「異極性合体」の二種類のシミュレーションを行えるように拡張をすることにも成功した。他にも、外部から合体する速度をコントロールする手法などの開発を進め、東京大学の球状トラス装置 TS-6 などで行われている実際の実験により近い状況を模擬するための取り組みを進めている。

核融合炉周辺輸送解析に向けた XGC のコード研究開発では、ヘリカル型核融合炉周辺プラズマにおける静電場解析を行うために、自由曲面上の階層格子系に適用可能な線形疎行列ソルバを開発した。平衡磁場構造に応じた最適化した格子系と荷電粒子軌道計算を組み合わせたテスト計算を行なった [9, 10, 11]。また、炉心プラズマで仮定される

ような磁気面構造を持たない磁場配位の別の例として、磁気島を含む配位におけるプラズマ輸送解析を行うため、磁気面・磁気島両方の磁力線構造を表すフラックスラベルを定義し、シミュレーションコードに導入した。これは、磁気島に応じた構造を持つ背景密度・温度分布を表現する時やフラックス平均操作を行う時に有用である。動作検証として、磁気島内部で平坦な温度分布を持つ場合の線形不安定性シミュレーションを実施し、磁気島の構造に応じた静電揺動が確認された。

磁気再結合の研究では、大きな成果は 2 つに大別して挙げられる。1 つ目は、リコネクション下流領域で生成されるマクスウェル分布から大きく離れた特異な速度分布に関する研究であり [7]、2023 年度は、その前年度から取り組んでいるイオンの三日月型速度分布のテーマを大きく進捗させた [2, 3, 20]。理論面では速度 2 次元、3 次元の 2 種類の理論モデルを構築した。2 次元理論では、2010 年代後半に確立された既存の理論モデルを発展させ、ガイド磁場に相当する一様な磁場だけが存在し、リコネクション磁場に相当する反転磁場が存在せずとも、三日月型速度分布が形成されることを示した。我々の理論モデルは既存モデルの枠組みは用いながらも、そこでは存在を前提としていた反転磁場を不要としたことから、この理論モデルの適用範囲を大きく広げたという意義もある。また、上記の既存理論や、人工衛星での観測によって「三日月型速度分布の形成には、磁場反転などの磁場の空間的な変化が必要である」が定説となっていた。さらには、「三日月型速度分布の観測は、その場所に磁場反転があることの証拠である」という主張も見られていた。しかし、今回の研究成果はこの定説とそれに基づく主張を覆し、三日月型速度分布の観測は磁場反転の存在の証拠にはならないことを示したものであり、これまでの観測に基づいた知見に大きな影響を

与える可能性がある大きな成果と言える[2]。また、3次元理論では、カノニカル運動量保存、エネルギー保存、磁気モーメント保存などに基づいて、三日月型速度分布の3次元構造を導出することに成功した。以上の理論は、PASMO コードを用いた磁気再結合の粒子シミュレーション結果と比較し、よい一致を見た。

2つ目の成果は、球状トカマク装置でのプラズマ合体による加熱機構探求に関するものである。このテーマでは、PIC-G2R コードを用いて、球状トカマク装置内にて磁気再結合を通してプラズマが合体する実験を模擬した粒子シミュレーションを実施した[24]。その結果、加熱機構は磁気再結合点の近傍だけのプロセスではなく、装置全体スケールに関わる現象であることを突き止めた。ここで起こっているイオン加熱を流体的な視点から見れば、合体途中では圧縮加熱が支配的であり、合体完了後は粘性加熱が優勢な時間帯もあることがわかった。一方、圧縮加熱を運動論的な視点で解明するため、速度分布を解析したところ、リング、部分リング型の速度分布を発見した。このことは、1つ目の研究テーマの具体的な状況への適用例にもなった成果という側面を持ち、球状トカマク装置内でも、ピックアップライクな実効的な加熱機構が働いていることを明らかにした。

境界領域プラズマ輸送現象の研究では、up3bd コードを用いて、初期に密度勾配のみを与えたプラズマからプロブ様の構造が生じる過程を再現する大規模シミュレーションの実行とその解析を進めた。終端板がある場合とない場合とを比較することにより、終端板の効果調べた。その結果、終端板により長波長揺動の成長が妨げられ、径方向輸送が抑えられたと考えられる傾向が捉えられた[14]。また、密度勾配に起因する不安定性により成長した揺動によってイオンが加熱される現象について、その粒子軌道の詳細を解析することなどにより調べた。その結果、

磁場に対して垂直方向に加速されたイオンだけでなく、平行方向に加速されたイオンも観測され、ともに、初期段階での回旋半径が鍵となることが示唆された[5, 21, 22, 23]。

高速粒子による波動励起の研究では、地球磁気圏と核融合のプラズマの両方で観測されている低域混成波とその高調波に注目している。これらの波は高速イオンによって生成されたと考えられているが、その生成機構の詳細は分かっていない。そこで、系に高速イオンを注入し続けるシミュレーションによって、高速イオンが駆動した低域混成波とその非線形結合によって、波数と周波数がそれぞれ整数倍となる高調波が形成されることを明らかにし、論文を発表した[1]。また、このような高調波構造が形成される条件を調べるために、低域混成波不安定性の支配パラメータである、電子サイクロトロン周波数とプラズマ周波数の比ならびに高速イオンの速度とアルヴェン速度の比の値を様々に変えてシミュレーションを行った。その結果、これらの広い値に対して高調波構造が形成されること、その構造の時間発展と維持はこれらの値によって強い影響を受けることを明らかにした。また、イオンと電子の質量比を実際の値とするシミュレーションによって、低域混成波の高調波が地球磁気圏の広い領域で生成される可能性を示した。これらの結果について、国際会議などで発表し[8, 15, 16, 17, 19]、論文を投稿した。また、宇宙と核融合のプラズマにはいずれも、低域混成波を励起しうる高速イオンが様々な種類で存在することから、不安定性の非線形発展におけるイオン種依存性についての解析も行った。線形理論では高速イオンの質量が大きいほど低域混成波の成長率は小さくなる。しかし、シミュレーションによって、高速イオンの質量が大きいほど、低域混成波は非線形発展の結果、より大振幅になることを明らかにした。これらは、高速イオンの速度分布

の変化が質量に大きく依存することに起因している。さらに、高速イオンの質量が大きくなると、高調波が生成されやすいことを示した。これらの結果について国際会議で発表し[13]、現在論文を執筆中である。

6. 進捗状況の自己評価と今後の展望

up3bd のコード研究開発では、今年度、衝突・素過程ルーチンの実装に向けた PAMCADE コードの動作検証、up3bd コードの Camphor3、AOBA-B への移植を行ったが、実装に向けた疑似乱数生成ルーチンに関する課題が生じたことなどによりやや遅れが出ている。これらのことをふまえ、進捗状況について定量的に自己評価すると、60%程度の進捗であった。今後は、疑似乱数生成ルーチンに関する課題を解決し、衝突・素過程ルーチンの実装を進めるとともに、各計算機での最適化を進め、大規模計算のベンチマークを行っていききたい。

PASMO のコード研究開発について、Camphor3 及び AOBA-B への移植をほぼ終えた。衝突項の計算ルーチンの最適化については、格子セル毎にループを回して衝突ペアの計算、速度更新の計算をしており、オーバーヘッドの多いアルゴリズムになっている。このアルゴリズムの書き換えで計算時間が向上するか調べたい。Camphor3 及び AOBA-B への移植、最適化への目途を建てられたことから、進捗状況の定量的な自己評価は 90%である。

PIC-G2R のコード研究開発については、これまでの球状トカマク配位でのプラズマ合体から、スフェロマック配位も扱えるように拡張したこと、さらにその中で、同極性合体・異極性合体の両方をシミュレーションすることに成功したことは、当初予定以上の進展であった。その一方で、素過程の粒子シミュレーションコードへの組み込みの一環として、当初計画していたクーロン衝突効果の PIC-G2R コードへの組み込み、および PIC-G2R を名大の Flow とは別種類の大型計算機に移植する作業は完了しなかった。これは、実験

面からも、球状トカマク配位とスフェロマック配位におけるプラズマ加熱効率を比較・検討する重要性が予想以上に増し、研究の優先順位を変えたことによる。今後は、非対称スフェロマック配位などにも取り組みつつ、素過程組み込みも進める予定である。進捗状況を自己評価すると 70%程度と言える。

核融合炉周辺輸送解析に向けた XGC のコード研究開発では新たに磁気島に関するテーマが入り、そのための準備（コードや手法開発など）が必要であった。磁気島は、磁気面構造を持たない磁場配位の重要な例であり、核融合炉周辺プラズマにも関連性が深い。しかしヘリカル型核融合炉への応用という点での進捗はやや限定的であった。当初計画に対する進捗は 50%程度と考えられる。今後は、ヘリカル方核融合炉周辺への応用に重点を置き、荷電粒子のドリフト運動と静電場構造に着目したシミュレーション結果の解析と、境界条件として仮定する炉心プラズマ条件についてパラメータランを進めていきたい。

磁気再結合現象の研究については、まず、イオンの三日月型速度分布に関するテーマでは、信じられてきた定説を覆し、これまでの観測結果に大きな影響を与える可能性がある重要な成果となった点は、当初予想以上の大きな進捗である。また、地球磁気圏内でイオン三日月速度分布が観測されうる領域を予測し、人工衛星観測分野へも貢献することができた[2]。このテーマについては大きな区切りを付けたと考えている。球状トカマクにおけるプラズマ合体のテーマに関しては、加熱の全体像を見るシミュレーションを実施したこと、イオン速度分布を解析して圧縮加熱の運動論的な視点からの解明に成功したこと[24]は当初計画通りである。一方、もう一方の粘性加熱については完全解明には至らなかった。今後は、粘性加熱解明に取り組みつつ、加熱のトロイダル磁場依存性を調べる。また、スフェロマック配位での加熱

機構も探求する。進捗状況を自己評価すると、総合すれば 100%近いと考えている。

境界領域プラズマ輸送現象の研究では、up3bd コードによる大規模シミュレーションを進め、プロブ構造の形成過程に関する理解の深化を目指すとともに、密度勾配起因のイオン加熱現象を調べたが、進捗状況について定量的に自己評価すると、60%程度の進捗であった。今後については、イオン加熱現象のパラメータランを行い、その特性を調べるとともに、up3bd コードに衝突・素過程ルーチンが実装された後には、非接触プラズマ状態を模擬した条件での輸送現象の計算を行い、その物理理解を進めたい。

高速粒子による波動励起の研究では、これまでの低域混成波不安定性に関する粒子シミュレーション研究が評価され、プラズマ・核融合学会で招待講演に選ばれた[17]。また、論文について発表・投稿・執筆中のものがそれぞれ一本ずつある。これらのことから進捗状況の自己評価は 100%といえる。今後は、低域混成波ならびにその高調波の非線形発展に関するパラメータ解析、高調波のサイドバンドを含む詳細構造解析、高速粒子が電子の場合のシミュレーション、宇宙における高速粒子生成に深く関与する非線形磁気音波の理論・数値解析などに取り組む予定である。

以上のように進捗にやや遅れがある課題もあるが、十分な進捗の課題もあり、研究課題全体の進捗は 75%以上である。

7. 研究業績

(1) 学術論文 (査読あり)

[1] T. Kotani, M. Toida, T. Moritaka, S. Taguchi, “Simulation study of the harmonic structure of lower hybrid waves driven by energetic ions”, *Physical Review E* 108 (2023) 0352082023

[2] S. Usami, S. Zenitani, “Three-dimensional crescent-shaped ion velocity distributions created by magnetic

reconnection in the presence of a guide field”, *Physics of Plasmas*, 31 (2024) 022102.

(2) 国際会議プロシーディングス (査読あり)

[3] S. Usami, S. Zenitani, “Three-Dimensional Ion Crescent-Shaped Velocity Distribution in Magnetic Reconnection”, JSST2023, Niigata, August 2023. (口頭)

[4] T. Moritaka, R. Hager(+), S. Ku (+) et al, “Development of a gyrokinetic simulation model toward whole-volume modeling of stellarators”, JSST2023, Niigata, August 2023. (口頭)

[5] H. Hasegawa, S. Ishiguro, “Analysis of plasma particle orbits in boundary layers with the efficient electrostatic particle-in-cell simulation code”, JSST2023, Niigata, August 2023. (口頭)

[6] H. Ohtani, S. Kawahara, “Advanced virtual-reality visualization for analysis of fusion plasma simulation data”, JSST2023, Niigata, August 2023. (口頭)

[7] S. Usami, R. Horiuchi, “Pseudo Maxwellian and Ring Velocity Distributions in Magnetic Reconnection”, AAPPs-DPP2023, Nagoya, November 2023. (招待講演)

(3) 国際会議発表 (査読なし)

[8] T. Kotani, M. Toida, T. Moritaka, S. Taguchi, “Parametric study of harmonic structure of lower hybrid waves driven by energetic ions”, JpGU meeting, Makuhari, May 2023. (ポスター)

[9] T. Moritaka, R. Hager(+), S. Ku(+), et al, “Electrostatic field calculation in the edge region of helical confinement devices based on the gyrokinetic model”, CCP2023, Kobe, August 2023. (ポスター)

[10] T. Moritaka, R. Hager(+), S. Ku (+)

et al, “Development of a gyrokinetic simulation model toward whole-volume modeling of stellarators”, JSST2023, Niigata, August 2023. (口頭)

[11] T. Moritaka, R. Hager(+), S. Ku (+) et al, “Electrostatic field calculation on a curved surface for gyrokinetic modeling of stellarator edge plasmas”, Global Plasma Forum in Aomori, Aomori, October 2023 (ポスター)

[12] S. Usami, R. Horiuchi, “Pseudo Maxwellian and Ring Velocity Distributions in Magnetic Reconnection”, AAPPS-DPP2023, Nagoya, November 2023. (招待講演)

[13] M. Toida, T. Kotani, ” Simulation study of nonlinear development of lower-hybrid wave instabilities: energetic-ion mass dependence”, AAPPS-DPP2023, Nagoya, November 2023. (ポスター)

[14] H. Hasegawa, S. Ishiguro, “Effects of End Plates and Kinetic Dynamics on Filamentary Plasma Structure Formations”, AAPPS-DPP2023, Nagoya, November 2023. (ポスター)

[15] T. Kotani, M. Toida, T. Moritaka, S. Taguchi, “Parametric study of harmonic structure of lower hybrid waves driven by energetic ions”, AGU Fall meeting 2023, San Francisco, December 2023. (ポスター)

(4) 国内会議発表 (査読なし)

[16] 小谷翼、樋田美栄子、森高外征雄、田口聡、“低域混成波高調波の励起および非線形発展に関するパラメーター依存性”、地球電磁気・地球惑星圏学会、仙台、2023 年 9 月。(口頭)

[17] 樋田美栄子、“高速イオンによる低域混成波不安定性の非線形発展に関する粒子シミュレーション”、プラズマ・核融合学会第 40 回年会、盛岡、2023 年 11 月 (招待講演)

[18] 長谷川裕記、石黒静児、“境界領域プラズマにおけるイオン加熱の 3 次元粒子シミュレーションによる研究”、プラズマ・核融合学会第 40 回年会、盛岡、2023 年 11 月。(口頭 (オーガナイズドセッション))

[19] 小谷翼、樋田美栄子、森高外征雄、田口聡、“高速イオン駆動による低域混成波の高調波構造に関する粒子シミュレーション”日本物理学会、2024 年春季大会、オンライン開催、2024 年 3 月 20 日。(口頭)

[20] 宇佐見俊介、銭谷誠司、“ガイド磁場磁気リコネクションで形成されるイオン三日月型速度分布”、プラズマシミュレータシンポジウム 2023, オンライン, 2023 年 9 月 (口頭)

[21] 長谷川裕記、石黒静児、“3 次元静電粒子シミュレーションによる境界領域における粒子軌道の解析”、プラズマシミュレータシンポジウム 2023、オンライン、2023 年 9 月。(ポスター)

[22] 長谷川裕記、石黒静児、“3 次元静電粒子シミュレーションにおける粒子運動の可視化”、先進的可視化技術とデータ科学の融合による可視化解析の研究会 (VR2023) 兼日本シミュレーション学会核融合・プラズマ及び関連分野の研究に関する可視化研究委員会研究会及び核融合科学研究所可知化センシングユニット第 7 回ユニットセミナー、土岐、2023 年 12 月。(口頭)

[23] 長谷川裕記、石黒静児、境界領域プラズマにおける巨視的構造と微視的ダイナミクスの研究”、日本物理学会 2024 年春季大会、オンライン、2024 年 3 月。(口頭)

[24] 宇佐見俊介、堀内利得、森高外征雄、“球状トカマク合体におけるイオン加熱機構の粒子シミュレーション研究”、日本物理学会 2024 年春季大会、オンライン、2024 年 3 月 (口頭)

(5) 公開したライブラリなど

(6) その他 (特許, プレスリリース, 著書等)