

jh220004

核融合プラズマ研究のための超並列粒子シミュレーションコード開発とその可視化

大谷寛明（核融合科学研究所）

概要

核融合プラズマで発生する微視的物理を正しく解きながら、装置全体にわたる巨視的現象を調べるため、「リアル粒子シミュレーション」をキーワードに研究を推進した。リアル粒子シミュレーションは衝突のような素過程を取り込み、イオン・電子質量比を実際の値でシミュレーションを行うなど、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ことを目指している。今年度は、これまで開発してきた粒子コードに Nanbu 法または Takizuka 法による Coulomb 衝突と、Null Collision 法による原子分子過程の実装を進めた。ジャイロ運動論 PIC コードの開発では、複雑な磁場形状に適合した空間格子系を生成し、マーカー粒子との補間スキームを開発・実装した。その場可視化ライブラリの研究ではメモリ消費量の削減やベクトル機向けにチューニングされたコードの SIMD 化の検討を進めた。

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（該当するものを残す）

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（該当するものを残す）

大規模計算科学課題分野

- (3) 共同研究分野（HPCI 資源を利用している研究課題のみ、該当するものを残す）

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・高度化、可視化研究

大野暢亮（兵庫県立大）：その場可視化研究

樋田美栄子、宇佐見俊介、長谷川裕記、森高外征雄、（核融合研）：粒子コード開発、粒子コードによる物理課題研究

沼波政倫（核融合研）：粒子コード高速化

三浦英昭（核融合研）、深沢圭一郎（京大）、田光江（情報通信研究機構）、小川智也（北里大）：流体シミュレーションとの比較、微視的物理のモデル化

堀内利得、石黒静児（核融合研）：問題設定、結果の評価

臼井英之、三宅洋平（神戸大）：動的負荷分散ライブラリの活用支援

片桐孝洋（名大）：TypeI サブシステムでの最適化・実行支援

2. 研究の目的と意義。

核融合プラズマで発生する磁気再結合やプロブ現象、非接触プラズマ過程、不純物輸送、高速粒子による波動励起などの正確な予測には、粒子運動のような微視的な物理を正しく解きながら、装置全体にわたる巨視的現象を調べる大規模シミュレーションが必要である。

「リアル粒子シミュレーション」をキーワードに研究を展開する。この「リアル」では、衝突のような素過程を取り込み、イオン・電子質量比を実際の値でシミュレーションを行うなど、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。また、上記の微視的現象をプラズマ物理における基礎的過程として捉え、粒子シミュレーションによって微視的物理機構の解明を行う。得られた結果から微視的現象をモデル化して巨視的なシミュレーションに組み込み、予測性の高い巨視的シミュレーションを実現することで、核融合プラズマの閉じ込め性能改善等に貢献する。シミュレーションデータの可視化解析を効率よく行うその場可視化の研究開発も行う。

研究課題① リアル粒子シミュレーションコードの研究・開発及び物理課題への応用：開発対象である PASMO 及び up3bd、XGC コードは 2021 年度までに FX1000 への移植を終え、最適化を行った。リアル粒子シミュレーションを目指して、2022 年度は素過程のモデルを導入し(Takizuka モデルや Nanbu モデル、Null collision 法を想定している)、計算効率向上など FX1000 での最適化を行う。物理課題研究では、磁気再結合における疑似マックスウェル分布形成条件の定量的解析及びフィラメント伝播における同位体効果の解析、高速粒子による波動励起で低域混成共鳴周波数付近の波の飽和レベルの解析には、更なる定量的解析やその定式化が必要であり、2022 年度は更なるパラメータランを行い、線形理論や実験結果と比較して、発生条件等の理論化を進める。

研究課題② モデル化研究：研究課題①と比較対照するためのイオン・電子 2 流体モデルコードの開発を行う。2021 年度までに決定したコードのアウトラインをもとに、コードの開発と最適化を進める。空間解像度及び時間発展を非常に微細にする必要がある一

方、これは大きな領域・巨視的運動を扱うことができる流体モデルの長所を損なう結果になる。これを克服するため、陰解法など手法・数値モデルについて検討を進める。

研究課題③ 「その場可視化」の研究・開発：2021 年度にその場可視化ライブラリ VISMO のソース及び可視化パラメータ設定ツールを公開した。VISMO でのメモリ消費によっては、ノード内メモリが少ない計算機では大規模なシミュレーションができなくなるという課題がある。2022 年度は VISMO でのメモリ使用を最適化して、SIMD 化やソフトウェアパイプラインによる FX1000 での更なる最適化・高速化を目指す。

本研究の成果は核融合プラズマ研究に限らず、天体プラズマ、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。磁気再結合の発生機構解明は、ディスラプション現象の抑制や球状トカマクでの初期加熱法の効率向上など、プラズマ閉じ込め性能を改善する。ブロボのダイナミクスは、核融合プラズマへの燃料補給過程と共通する部分が多く、その挙動の正確な予測は核融合発電実現への大きな飛躍をもたらす。高速粒子による波動の励起機構とパラメータ依存性の解明は新たな非線形現象の発見やプラズマの新たな計測法の開発につながる。プラズマ素過程を含む粒子コードはプロセスプラズマの研究へと展開が期待できる。磁気再結合やブロボ現象のフィラメント構造、高速粒子による波動励起は宇宙プラズマなどでも見られる普遍的な現象及び構造である。

3. 当拠点の公募型研究として実施した意義

本研究課題の推進には、計算科学分野、計算機科学分野、可視化情報学分野の協調的かつ相補的な研究体制が必要不可欠である。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の先導的研究者の協力の下、幅広い研究分野の研究者を含む研

究体制を構築して、名古屋大学 FX1000 でのコード開発・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

(1)粒子コード開発では、ループ分割や粒子データ配列のスレッド並列用次元の要素数変更等による最適化、ジャイロ運動論モデルをヘリカル核融合炉の複雑な周辺磁場構造に適用するための要素手法開発を行った。(2)粒子コード結果のモデル化研究では、粒子コードとのハイブリッド化を前提とした PIC 部分のコード開発を推進した。(3)その場可視化研究では、VISMO ライブラリ公開、1次元及び2次元のデータ描画ルーチン作成を行った。物理機構の研究では、磁気再結合現象における特異な速度分布の体系化を進めた。周辺プラズマ輸送の研究では終端板の傾斜の効果の解析を行った。高速粒子注入モデルを用いた開放系長時間シミュレーションによってイオンの加速や波動間非線形結合に関する新たな知見が得られた。

5. 今年度の研究成果の詳細

課題 1 : up3bd 及び PASMO コード開発では、Takizuka 法または Nanbu 法による Coulomb 衝突のルーチンと、Null Collision 法による原子分子過程のルーチンの実装検討及び実際の実装を進めた。これらの素過程計算に用いる並列疑似乱数生成コード KMATH_RANDOM 導入の検討を、名古屋大学情報基盤センターにも協力を仰ぎ、進めた。

Takizuka 法及び Nanbu 法はプラズマの Coulomb 衝突の計算手法として広く用いられている。Takizuka 法では、毎時間ステップに近接した粒子のペアリングを行い、ペアとなった粒子間の二体衝突による微小角散乱をモンテカルロ法によって計算する。他方、Nanbu 法では、微小角散乱を累積させた大角散乱を、微小角散乱を計算することなく、一

度に計算する。この手法では毎時間ステップに衝突の計算をする必要はなく、適当な長さの時間ステップ間隔で近接した粒子のペアリングを行い、ペアとなった粒子間で累積散乱を計算するため、演算数を減らすことができる。また、原子分子過程計算で用いられる Null Collision 法では、すべての粒子について衝突(素過程)の計算をするのではなく、最大の衝突確率を予め算出しておき、全粒子数にその確率を乗じて得られた粒子数の粒子についてのみ素過程の計算を行うことで、計算負荷を低減させている。

up3bd コードについては、Nanbu 法による Coulomb 衝突と Null Collision 法による原子分子過程の実装をめざしているが、その前段階として、すでに当該ルーチンが組み込まれ、かつ、KMATH_RANDOM を使用している非接触ダイバータプラズマ研究のための空間 1次元速度 3次元 (1D3V) 静電粒子コード (PAMCADE コード) について、FLOW-Type I における実行検証を進めている。また、今年度は、これまで他の開発を優先させていたために滞っていた粒子軌道保存ルーチンの開発をほぼ完了させた。実装にあたっては、新たに保存ルーチン用の MPI コミュニケータを用意することによって、粒子コード主要部の計算に極力影響を与えないようにした。さらに、本コードで利用している FFT ライブラリ 2Decomp&FFT が任意の MPI コミュニケータに対応していないことが判明したため、同ライブラリの改良も合わせて実施した。

PASMO コードについては、Takizuka 法による Coulomb 衝突ルーチンの実装を進めた。PASMO コードは 2019 年度 JHPCN 課題研究で、粒子情報に関する配列の構造を変更すること(具体的には、X(14,IPT,NDE)のように3次元目にスレッド並列用の次元を設けていたが、X(14,IPTN) (IPTN=IPT×NDE)のようにスレッド並列用の次元を廃止した)、

バケット処理/ソーティング処理の追加、アクセス制御変数で並列化されるようにループ構造の変更などによって、演算処理待ちの減少、スレッド並列インバランスの改善、L2 ミスの減少がなされ、全体として実行時間を 53.9%まで削減することに成功している。今回導入を試みた Takizuka 法による Coulomb 衝突ルーチンは、この改良を行う前に開発を進めていた。そのため、ルーチン内の粒子情報に関する配列の構造を X(14,IPT,NDE)から X(14,IPTN)への変更、DO ループ構造の変更などを行った。また、衝突をさせる粒子のペアを乱数によって決めているが、その決定ルーチンの引数を変更するなどして、現行の PASMO コードに Takizuka 法による Coulomb 衝突ルーチンの実装を行い、FLOW-Type I における実行検証を進めた。また、ベンチマークのため、核融合科学研究所の SX-Aurora TSUBASA での実行も試みたが、50 ステップの計算に 16 時間もかかり、実用には堪えない実行時間となった。最適化を阻害する要因を調査したところ、ループ内で WRITE 文と演算処理の混在、3 重ループの最適化、乱数列から MPI プロセス毎に使用する乱数列のピックアップによるループの依存性などが見つかった。

ジャイロ運動論 PIC コードの開発では、ヘリカル核融合炉周辺領域を対象としたプラズマ輸送解析を実現するため、複雑な磁場形状に適合した空間格子系を生成し、マーカー粒子との補間スキームを開発・実装した。空間格子については、平衡磁場に垂直な曲面を数値最適化によって生成し、その曲面を貫通する磁力線に応じた階層格子を生成した [9,10]。粒子と格子との間の補間を磁力線に沿って行うために、曲面との交差判定を含む高精度な磁力線追跡ルーチンを実装した。

物理課題研究：

磁気再結合研究では、リコネクション下流

領域で形成される非マクスウェルの特異な速度分布に関する研究を進めた。昨年度までに、マクスウェル速度分布と形状面では酷似しているが熱化過程は働いてない「疑似マクスウェル速度分布」を発見していたが、その疑似マクスウェル速度分布の形成条件を定量的に導き出し、粒子シミュレーション結果とよく一致することを確認した。また、これまで速度空間での 2 次元構造として捉えていた特異な速度分布が、3 次元的な構造を持っていることを見出したので、その中でも特に、イオンの三日月型速度分布についての研究を進めた。三日月型分布を形成するイオンは、リング型や疑似マクスウェル型分布と同じ基本運動（ガイド磁場に関してジャイロ運動して、 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトする）をしていることを明らかにし、2 次元構造三日月の理論を拡張することで、3 次元構造理論を構築することに成功した。また粒子シミュレーションで観測された速度分布と比較して、3 次元構造理論がよくあっていることを確認した。一方、磁気再結合の応用例として、球状トカマク装置内におけるプラズマ合体を模擬した粒子シミュレーションを実施した。イオン温度が上昇している領域で、リング型および部分リング型のイオン速度分布を見出した。また、これからの結果から、真の加熱ではなく、実効的な加熱が強いことを明らかにした。

境界領域輸送研究では、一昨年度から昨年度にかけて最適化を進めた 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を実行し、その結果の解析を進めた。その結果、初期に磁力線方向に短波長な密度揺動が成長したのち、長波長な揺動へ遷移すること、また、粒子束の観測から、密度揺動の成長により現れた高密度なプラズマ構造が外側方向へ輸送されることが示された [11,19]。

高速粒子による波動励起の研究では、高速

イオンを注入し続けるシミュレーションによって、低域混成波に加えてその高調波が励起されることを示すとともに、その励起機構を明らかにした。この成果をまとめた論文を投稿し、現在修正中である[2]。また、地球磁気圏の極域上空で、人工衛星によって観測されていた低域混成波の高調波構造に注目し、シミュレーション解析を行った。実際の値に近いパラメータを使ってシミュレーションを行ったところ、低域混成波の高調波構造を再現することに成功した。また、高調波がイオンの加速を促進するという新たな可能性を提示した。この成果について、国際会議などで報告するとともに[12,14,20]、論文を発表した[3]。また、宇宙と核融合のプラズマはいずれも、波を励起する高速イオンは様々な種類があることから、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調査も開始し、国際会議などで発表した[13,21]。

課題 2 : 課題 1 と比較対照するためのイオン・電子 2 流体モデルを実装するのに必要な、手法・数値モデルの検討をさらに進めた。流体の圧縮性に対応する数値不安定性に対応するため、場の方程式の摂動法に基づく数値フィルターについて調査を進めた。イオンスケールを基準に数値フィルターを設定すると、電子の運動を過度に安定化するため、数値フィルターの性質(カットオフ波数の位置)、フィルターの強度などについて検討を進めている。

課題 3 : その場可視化ライブラリ VISMO の研究開発では、メモリ使用の最適化に取り組んでいる。ライブラリ内でのメモリ利用を節約し、シミュレーション側で使用できるメモリ量を増やすことが目的である。

VISMO ライブラリのメモリ消費を抑えるため、描画データを保存する配列のサイズを小さくする試みを行った。現状 RGBA 各 4 バ

イト、つまり 1 ピクセル当たり合計 16 バイト使用して保持していた。これを 1 ピクセル当たり 4 バイトで保持するサブルーチンを作成した。これにより、可視化画像のピクセルサイズを従来より大きくすることができるようになった。

SIMD 化については、ベクトル計算機である NEC SX 用に最適化を進めているコードを基に調査を実施した。FX1000 において等値面を描くジョブを実行したところ、通常コードで 0.45 秒に対し SX 用コードでは 0.89 秒要した。今回のテストにより、単純に SX 用コードでは SIMD による高速化ができないことが分かった。

6. 進捗状況の自己評価と今後の展望

課題 1 : PASMO 及び up3bd コードへの素過程ルーチン実装では、特に粒子ソートや粒子ペアの生成、乱数列の利用方法が最適化の課題である。up3bd コードでは、すでに計算実績のある PAMCADE コードの実行検証などもふまえて、素過程ルーチンの実装、最適化検討、疑似乱数生成ライブラリ導入を着実に進める。進捗状況について定量的に自己評価すると、up3bd コードについては 60%程度の進捗であった。

他方、PASMO コードへの Takizuka 法による Coulomb 衝突ルーチンの実装では、今年度中に FLOW-Type I での実行を確認できた。また、ベンチマークとして核融合科学研究所の SX-Aurora TSUBASA で実行して、最適化を阻害する要因を見つけることができた。このベンチマークで見つかった知見を活かして、FLOW-Type I での最適化を進める予定である。進捗状況について定量的に自己評価すると、PASMO コードへの Coulomb 衝突ルーチンの実装ができたことを踏まえて、80%程度の進捗であった。

XGC コード開発では、これまでに生成した非構造格子系を用いて、ヘリカル核融合炉

周辺領域における典型的な静電場構造を求め、 $E \times B$ ドリフト運動を介して、ダイバータに向かう粒子の流れにどのような影響を与えるかを検証する。昨年度までに、大型ヘリカル装置炉心領域に対する物理シミュレーションの結果を論文にまとめ[1]、複雑な周辺磁場構造の影響を強く受ける静電場計算スキームの開発と時間ステップサイクルへの組み込みを進めることができたが[9,10]、二体衝突や電離過程のモデリングが課題として残されている。そのため、進捗率は 80% 程度である。

物理課題研究：

磁気再結合研究では、当初の計画通り、疑似マクスウェル速度分布の形成条件を定量的に導出することに成功した[4,15]。また、三日月型速度分布の 3 次元構造を説明する理論を構築したこと[16,17]、および、磁気再結合の応用として球状トカマク装置内におけるプラズマ合体の粒子シミュレーションを実施し、その環境でもリングや部分リングの特異な速度分布を発見したこと[6,7,8]は、計画以上の進展である。前者は、地球磁気圏などにおける人工衛星による速度分布観測との連携につながる可能性がある成果であり、後者の球状トカマク合体への応用は、将来の核融合に必要な高温プラズマを生成する加熱手法への貢献につながる大きな成果と言える。以上の進捗によって、国際会議 4 回（うち査読有り 1 回）、国内会議 3 回の発表ができた。特に、球状トカマクへの応用の成果は、6th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, Division of Plasma Physics の基調講演に選ばれ[8]、疑似マクスウェル速度分布に関する成果は、プラズマシミュレータシンポジウム 2022 の招待講演に選ばれた[15]。このことから、進捗状況について定量的に評価すると、100%以上である。今後は、これまで見出してきた、リング型、部分リング型、

三日月型の特異な速度分布から生じる不安定性を調べる他、球状トカマク合体への応用面に関する研究もさらに進める。

境界領域輸送研究では、up3bd コードによる大規模シミュレーション結果の解析を進め、ブロボ様構造の形成過程に関する理解の深化をめざした。今年度は、密度勾配のみを与えた状態からプラズマ輸送が生じる過程を再現したが、今後は、非接触プラズマ状態での計算なども可能とすることにより、より現実的な条件での輸送現象の計算、その機構理解を進めたい。さらに、今年度実装を完了した粒子軌道保存ルーチンを用いた粒子軌道解析による研究を展開したい。進捗状況について定量的に自己評価すると、70%程度の進捗であった。

高速粒子による波動励起の研究では、低域混成波ならびにその高調波の非線形励起機構やその条件について、さらなる解析を進める。また、波の振幅やエネルギー輸送量などが、波を励起する高速イオンの質量などに、どのように依存するのかについても、詳細な解析を行う。進捗状況について定量的に自己評価すると、60%程度である。

課題 2：イオン・電子 2 流体モデルとして提案されているいくつかのモデルの中から適切と思われるモデルを絞り込み、実装を進めている。数値フィルターをこの問題に合わせて新規開発することにしたため、当初予定よりも研究が遅れている。進捗状況について定量的に自己評価すると、50%程度である。

課題 3：その場可視化ライブラリ VISMO の開発では、現在作業しているメモリの最適化後、SIMD 化などに着手して、高速化できるか検討する予定である。

進捗状況について定量的に自己評価すると、VISMO のメモリの最適化に関しては、画像の保存領域の削減に成功し、目的は達成

されたと考える。SIMD 化の検討に関しては、SX 用コードでは高速化が期待できないことが判明し、今後の開発の方向を検討する準備が整ったが、方向性を打ち出すまでは至っておらず、70%の達成と考える。

各課題で具体的なルーチンの実装や検討が進み、また、物理課題研究においても成果が得られ、論文発表や学会発表を行うことができた。課題の進捗状況は 50%程度の課題もあるが、100%以上の課題もあり、課題全体では 70%以上の十分な進捗があったと考える。

7. 研究業績

(1) 学術論文 (査読あり)

[1] T. Moritaka, H. Sugama, M. Cole(+), R. Hager(+), S. Ku(+), C-S. Chang(+), and S. Ishiguro, “Isotope effects under the influence of global radial electric fields in a helical configuration”, Nuclear Fusion 62, 126059 (2022).

[2] T. Kotani, M. Toida, T. Moritaka, and S. Taguchi, “Simulation study of the harmonic structure of lower hybrid wave driven by energetic ions”, Physical Review E, in revision.

[3] T. Kotani, M. Toida, T. Moritaka, and S. Taguchi, “Harmonic Structure of Lower Hybrid Waves Driven by Energetic Ions at 4000 km Altitude: PIC Simulation”, Geophysical Research Letters, Vol. 50 (2023), e2022GL102356.

(2) 国際会議プロシーディングス (査読あり)

[4] S. Usami and R. Horiuchi, “Pseudo-Maxwellian and Ring Velocity Distributions in a Magnetized Plasma”, The 41st JSST Annual International Conference on Simulation Technology

(JSST2022), Online, August 31 – September 2, 2022 [oral]. Proceedings of JSST2022, 252 (OS7(5)-2) (2022) **【口頭発表】**

[5] H. Hasegawa, and S. Ishiguro, “Improvement of the efficient electrostatic plasma particle simulation code for the investigation of boundary layer plasmas”, The 41st JSST Annual International Conference on Simulation Technology (JSST2022), Online, August 31 – September 2, 2022 [oral]. Proceedings of JSST2022, 248 (OS7(5)-1) (2022) **【口頭発表】**

(3) 国際会議発表 (査読なし)

[6] S. Usami, R. Horiuchi, T. Moritaka, and Y. Ono, “Investigation of ion heating mechanism during the plasma merging in a spherical tokamak”, The 31st International Toki Conference on Plasma and Fusion Research, online, 8-11 November 2022 **【ポスター発表】**

[7] R. Horiuchi, T. Moritaka, S. Usami, and Y. Ono, “Guide-field dependence of a merging process of two spherical-tokamak-type Plasmoids”, 27th International Conference of Numerical Simulation of Plasmas (ICNSP2022), Online, August 30 – September 2, 2022 **【口頭発表】**

[8] R. Horiuchi, T. Moritaka, S. Usami, H. Tanabe, and Y. Ono, “Guide-field dependence of a merging process of two spherical-tokamak-type plasmoids”, 6th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, Division of Plasma Physics (AAPPs-DPP2022), Online, October 9-14, 2022. **【Topical Plenary】**

[9] T. Moritaka, M. Cole(+), R. Hager(+), S. Ku(+), C-S. Chang(+), and S. Ishiguro, “Recent progress on numerical

development toward core-edge modeling of stellarators”, 6th Asia Pacific Conference on Plasma Physics, Online, 9-14 October 2022 **【招待講演】**

[10] T. Moritaka, M. Cole(+), R. Hager(+), S. Ku(+), C-S. Chang(+), and S. Ishiguro, “Electrostatic field calculation in the edge region of a helical fusion device using the gyrokinetic model”, The 31st International Toki Conference on Plasma and Fusion Research, online, 8-11 November 2022 **【ポスター発表】**

[11] H. Hasegawa, and S. Ishiguro, “Three-Dimensional Particle-in-Cell Simulations for Study of Filamentary Plasma Structure Formations”, The 31st International Toki Conference on Plasma and Fusion Research, online, 8-11 November 2022 **【ポスター発表】**

[12] T. Kotani, M. Toida, T. Moritaka, and S. Taguchi, “Simulation study of the harmonic structure of lower hybrid waves driven by energetic ions”, The International Conference on Numerical Simulation of Plasmas (ICNSP), online, August 30-September 2, 2022 **【ポスター発表】**

[13] M. Toida and T. Kotani, “Energetic ion mass dependence of nonlinear development of lower-hybrid wave instabilities”, The 31st International Toki Conference on Plasma and Fusion Research, online, 8-11 November 2022 **【ポスター発表】**

[14] T. Kotani, M. Toida, T. Moritaka, and S. Taguchi, “Simulation study of harmonic lower hybrid waves due to energetic-ion-driven instabilities”, The 31st International Toki Conference on Plasma and Fusion Research, online, 8-11

November 2022 **【ポスター発表】**

(4) 国内会議発表 (査読なし)

[15] 宇佐見俊介、堀内利得：「リング速度分布と疑似マクスウェル速度分布の関係ー磁気再結合を例にしてー」、プラズマシミュレータシンポジウム 2022、オンライン、2022 年 9 月 29 日-30 日 **【招待講演】**

[16] 宇佐見俊介、銭谷誠司、堀内利得：「磁気リコネクションで形成されるイオンの三日月型速度分布」、第 39 回プラズマ・核融合学会年会、富山国際会議場(富山市)、2022 年 11 月 22 日-25 日 **【口頭発表】**

[17] 宇佐見俊介、銭谷誠司：「磁気リコネクション下流におけるイオン三日月型速度分布の形成過程」、日本物理学会 2023 年春季大会、オンライン、2023 年 3 月 22 日-25 日 **【口頭発表】**

[18] 長谷川裕記、石黒静児，“多階層的アプローチによる境界領域輸送ダイナミクスの研究”，プラズマシミュレータシンポジウム 2022，オンライン，2022 年 9 月 29-30 日 **【ポスター発表】**

[19] 長谷川裕記、石黒静児，“プラズマファイラメント形成の 3 次元粒子シミュレーションによる研究”，日本物理学会 2023 年春季大会，オンライン，2023 年 3 月 22-25 日 **【口頭発表】**

[20] 小谷翼、樋田美栄子、森高外征雄、田口聡，“Simulation study of the harmonic structure of lower hybrid wave driven by energetic ions: comparison with observation”，地球電磁気・地球惑星圏学会，相模原，2022 年 11 月 3 日-7 日 **【口頭発表】**

[21] 樋田美栄子、小谷翼，“低域混成波非線形発展における高速イオン質量依存性”，日本物理学会，オンライン，2023 年 3 月 22 日-25 日 **【口頭発表】**

(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）