

jh180006-NAH

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 ディスラプションやプロブ現象のように、微視的物理が核融合プラズマ閉じ込め装置全体に影響を与えるような現象に対して、微視的物理からその発生機構の解明を目指して、粒子シミュレーションを基礎としたコード開発・微視的物理のモデリング・シミュレーション結果のその場可視化の研究を進めている。PASMO コードの動的負荷分散アルゴリズムに対応した開放系境界条件のコード化、p3bd コードの領域分割型分散並列化、MUTSU/MINOS コードの SGS モデルの改良、パラメータ繰り込み型の多階層モデル研究を進めた。また、その場可視化研究では粒子表示機能の拡充に成功した。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

本課題は、核融合科学研究所（核融合研）、兵庫県立大学、神戸大学、京都大学、名古屋大学、情報通信研究機構（情報通信研）、北里大学の複数の研究者が参加する共同研究であり、名古屋大学の大規模計算資源を利用する。

(2) 共同研究分野

■ 超大規模数値計算系応用分野

(3) 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・可視化研究

大野暢亮（兵庫県立大）：その場(In-Situ)可視化の研究・開発

宇佐見俊介（核融合研）：粒子コードと流体コードの連結

樋田美栄子、沼波政倫、長谷川裕記（核融合研）：粒子コードの移植・高速化

三浦英昭（核融合研）、田光江（情報通信研）、小川智也（北里大）、深沢圭一郎（京大）：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（核融合研）、石黒静児（核融合研）：問題設定、結果の評価

中島 浩（京大）、臼井英之（神戸大）、三宅洋平（神戸大）：動的負荷分散ライブラリの開発、実装、活用支援

荻野正雄（名大）：FX100 での最適化・実行支援

2. 研究の目的と意義

核融合発電の実現には、コアプラズマの高性能化やその制御とともに、周辺領域プラズマの挙動理解とその制御、プラズマ中の高速粒子が及ぼす影響の理解も重要である。しかし、磁気再結合が引き金となってプラズマ全体が崩壊するディスラプション現象や、プロブ現象のような周辺領域における動径方向のプラズマ輸送、ダイバータ板への熱流通減のための非接触プラズマ過程、不純物輸送、高速粒子が励起する波動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扱い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。微視的物理を扱う有効な手法として、荷電粒子の運動方程式と Maxwell 方程式を自己無撞着に直接解く粒子シミュレーションモデルがあるが、膨大な粒子を計算する必要があるため、巨視的な時空間スケールを扱うことが困難である。他方、大規模シミュレーションではストレージの制限などから計算した全データを保存することは不可能であり、また、解析用マシンのメモリ不足から全データを可視化解析するなどのポストプロセスも困難である。今後ますます規模が大きくなることが予想されるシミュレーションに対して、その結果の可視化解析をどのように行うかも喫緊の課題である。

本研究課題は、上記のような微視的物理が装置スケールのダイナミクスに影響を与えるような現象に対して、第一原理からその発生機構の解明や挙動の正確な予測を行い、核融合プラズマの閉じ込め性能改善等へ寄与することを目的とする。次の 3 つの課題

について、研究・開発を推進する。これら研究課題の推進により、粒子コード・モデリング・可視化までをまとめる総合的な研究基盤の構築を目指す。

①粒子モデルを基礎としたシミュレーションコードの研究・開発：超並列に対応した粒子シミュレーションコードの研究・開発を行う。H30 年度は、PASMO コードでは 0hHe1p ライブラリ活用のための最適化及び 0hHe1p ライブラリに対応した開放系境界条件のコード化を行う。p3bd コードでは領域分割型分散並列化コードの開発を進め、同コードの最適化（粒子ソートの導入等）、計算検証などを実施する。

粒子コードの開発とともに各物理課題の研究も進める。H30 年度は、磁気再結合研究では、イオン加熱の反平行磁場（ポロイダル磁場）強度、縦磁場（トロイダル磁場）強度が異なる様々な環境下でシミュレーションを行い、それぞれの磁場依存性を示して実験と比較する。周辺領域におけるプラズマ輸送の研究では、フィラメントによる不純物イオン輸送の物理パラメータに対する依存性を調べるとともに、フィラメント現象における同位体効果や 3 次元的な粒子運動効果について研究する。高速粒子による波動励起に関する研究では、低域混成共鳴周波数付近の波の不安定性に注目する。特に、プラズマの密度が上昇すると、低域混成共鳴周波数が上昇するが、それが不安定性に及ぼす影響を調べる。そのために、プラズマの密度を上昇させるとともに、高速粒子を注入し続けるシミュレーションを行う。

②巨視的シミュレーションに活用するための第一原理に基づく微視的現象のモデル化研究：モデル化研究や多階層モデルの研究を進め、経験的モデルより予測性の高い巨視的シミュレーションの実現を目指す。H30 年度は、(1)MUTSU/MINOS コードおよび MINOS コードにおける微視的効果のパートを高度化、最適化したうえで、不安定性などについて粒子シミュレーションと比較、改良を目指す。(2)微視的物理と巨視的物理を同時に解く多階層モデル研究では、パラメータ繰り込み型手法に焦点を当てて開発を進める。同一の状況下において圧力駆動型不安定性の MHD シミュレーションと粒子シミュレーションを行うことにより、運動論効果が不安定性成長率などに及ぼす影

響を見出し、その運動論効果をモデル化することにつなげる。

③「その場可視化」の研究・開発：大規模シミュレーション結果の可視化解析に関する課題の解決方法の一つとして、計算実行とともに可視化作業を行う「その場可視化」の研究・開発を行う。H30 年度は、CAVE 用及び PC 用点群ビューアの充実を図り、カーテシアン以外の座標系の検討を進める。

3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

本研究課題は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したグランドチャレンジ的な問題である。また、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。このように幅広い研究分野の研究者を含む研究体制を構築するため、多数の先導的研究者が在籍する JHPCN 公募型共同研究で実施する必要がある。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

PASMO コードでは 0hHe1p ライブラリ（粒子コード向けの動的負荷分散ライブラリ）の実装及び検証を行った。p3bd コードでは領域分割型分散並列に対応したポアソンソルバーの開発と実装及び、領域分割型分散並列化コードの開発を進めた。各物理課題の研究では、磁気再結合研究では下流におけるイオン粒子の軌道を詳細に解析し、計算結果と実験結果との比較を行った。周辺領域におけるプラズマ輸送の物理研究では、フィラメント構造現象の計算に関して基本的な理論モデルとの比較検証を行い、不純物イオン輸送の研究を進めた。高速粒子による波動励起に関する研究では、初期に高速粒子を与えてその後の発展を電磁粒子シミュレーションで追跡した。多階層モデル研究では、階層連結手法の改良に取り組み、Hall MHD と PIC 連結モデルによるホイッスラー波伝播の検証に取り組んだ。その場可視化の研究では、点群データのサイズ縮小機能を拡張して VISMO 本体に実装し、MHD コードと結合して実際に可視化画像が出力できることを確認した。

5. 今年度の研究成果の詳細

【コード研究・開発】

・PASMO コード：PASMO コードは、磁気再結合研究の

ため開発された 2 次元あるいは 3 次元の電磁粒子シミュレーションコードである。このコードの特長は、上流から磁場フラックス及びプラズマを流入させることにより、磁気再結合を駆動することができ、また、下流では粒子が自由に出入りできる開放系境界条件を用いていることである。このため、長時間のシミュレーションが可能であることが開発意義である。H29 年度に OhHelp を組み込んだ PASM0 は、着実に組み込みを行うため、周期境界条件の下で開発を進めた。この PASM0 に対して開放系境界条件を組み込む開発を進めた。PASM0 の粒子に対する開放系境界条件では、境界のセル内に存在する粒子を消去してから、上流境界のセルでは磁場の強さに比例した個数でマクスウェル分布を満たすように新たに粒子を配置して ExB ドリフトを与え、下流境界のセルでは境界より内側のセル内の粒子と同じ分布になるように新たに粒子を配置している。これに対して OhHelp ライブラリでは、計算負荷の大きい領域(粒子シミュレーションでは粒子数が多い領域と等価)がある場合、計算負荷少ない領域を担当する MPI プロセスに、計算負荷の大きい領域の場の情報と一部の粒子情報を転送する。そのため、PASM0 の粒子開放系境界条件を OhHelp 組み込み済み PASM0 に適用する場合、転送先の粒子情報を転送元へ送る必要がある。PASM0 の粒子開放系境界条件に対するアルゴリズムの再検討と OhHelp を組み込んだ PASM0 への適用方法の開発を進めた。このように目標達成に向けた研究開発を進めることができた。

・p3bd コード:p3bd コードの特長としては、①PASM0 コードと同じく 3 次元空間における多数のプラズマ粒子(分散並列により数億個以上の粒子を扱うことが可能)の運動と、それと自己無撞着な電場の時間発展を解けること、②x 軸方向の片側の境界、および、z 軸方向の両側の境界を、プラズマ粒子が吸収される境界、かつ、静電ポテンシャルが 0 となる(すなわち接地)境界とすることによって、磁場閉じ込めプラズマ周辺部の開いた磁力線領域(スクレイプ・オフ・レイヤー)を模擬していること、③静電コードであるため、磁場の時間発展を解く必要がなく(ただし、ベータ値(プラズマ圧力と磁場圧力の比)が十分

小さい状況に限られる)、電磁コードに比して計算資源を節約できること、などが挙げられる。そして、スクレイプ・オフ・レイヤーのプラズマ輸送現象における微視的ダイナミクスを解明することが p3bd コードの開発意義である。今年度は、昨年度に引き続き、すでに開発が完了している領域分割型分散並列に対応したポアソンソルバーを用いて、p3bd コードの領域分割型分散並列化版コードである up3bd の開発を進めた。今年度前半は、磁力線方向(z 方向)を周期的境界条件、かつ、x 方向の両端を反射境界としたバージョンの up3bd コードの開発と、その計算精度等についての検証を行った。この領域分割型分散並列化により、コード性能(理論ピーク性能比)は従来コードの 2~3 倍となり、メインループでの実効並列化率は 99.959% (並列化効率が 50% となる時のノード数は 2,439 ノード)(FX100 にて測定した Weak Scaling から算出)となった。今年度の後半においては、up3bd への粒子ソートの導入を行い、その結果、計算速度が 1.4 倍となった。また、磁力線方向(z 方向)の両端、及び、x 方向の片側の境界(x = 0)を粒子吸収境界としたバージョンの up3bd コードの開発を進めるとともに、2019 年度に予定している「その場可視化」ライブラリ VISM0 の up3bd への導入に向けたコード整備も行った。このように並列化に対応した粒子コード p3bd の開発という点で目標を達成することができた。

【モデル化研究】

・MHD コード:核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)内部に閉じ込められた高温プラズマの不安定性をシミュレーションするための電磁流体力学(MHD)方程式数値シミュレーションコード MUTSU/MINOS コードの開発を進めている。このコードはジャイロ粘性効果を含む拡張 MHD シミュレーションコードであり、格子解像度以下のサブグリッドスケール(SGS)が格子解像度以上のスケール(グリッドスケール)への影響を表す SGS モデルを実装し、Large Eddy Simulation (LES) コードである。このように、格子解像度以下の影響も取り入れて装置全体の不安定性をシミュレーションできるようにすることがこのコード開発の意義である。昨年度に引き続き、

MUTSU/MINOS コードの機能拡張を行った。昨年度実装した SGS モデルについて改良を行い、交換型・テアリング不安定性の遷移現象の 2 次元シミュレーションにこれを応用した。比較的少ない格子点数で安定な数値シミュレーションが実施できることなど、期待通りの特性が得られている。このように格子解像度以下の微視的な効果を取り込む LES コードの改良を進めることで、微視的現象のモデル化研究は順調に成果を上げることができた。

・階層連結手法：プラズマ現象における階層横断現象を完全に理解することを目指して多階層モデルの開発を進めている。このモデルの開発意義は微視的モデルではカバーできない巨視的な系に対して、経験的モデルによらない予測性の高い巨視的シミュレーションの実現することである。多階層モデルは、実空間分割型とパラメータ繰り込み型の 2 種に大別できる。今年度は、主にレイリーテイラー不安定性における階層性に着目し、後者の手法に基づいた多階層モデルの開発を推し進めた。パラメータ繰り込み型の多階層モデルでは、第一原理計算（例えば、粒子シミュレーション）から得られた結果を、何らかの仮定・条件の下でモデル化して、マクロなスケールの基礎方程式（たとえば、MHD 方程式）に組み込むことが必要である。そこで、これまでに実施された MHD シミュレーションと同じ物理条件でレイリーテイラー不安定性の粒子シミュレーションを行って、両者の結果の比較を進めた。まず、これまで磁気再結合に用いている PASMO コードの境界条件、初期配位を変更すること、レイリーテイラー不安定性の大規模な粒子シミュレーション実施した。しかし、これまでの MHD シミュレーションとスケールも含めてより精密に比較するためには、粒子シミュレーションの規模を拡大させる必要であることが明らかとなった。そこで後期には、本課題中で開発している PASMO コードに採用されている手法を一部取り入れて、さらに大規模な粒子シミュレーションの実施に取り組んでいる。このように目標達成に向けて、パラメータ繰り込み型手法によるモデル化研究を進めた。

【その場可視化の研究・開発】

・VISMO の研究・開発：その場可視化では、シミュレーションの実行時に生データではなく可視化した画像を出力する。このため視点や内面レベルなどの可視化パラメータが固定されてしまい、異なる視点から観察するなどの対話的な操作はできない。我々はその場可視化した結果を画像のみでなく点群として保存する機能を、独自開発しているその場可視化ライブラリ VISMO に実装した。またその点群を表示するための専用ビューアを開発した。この点群を使って画像情報を保存・表示できる点がこのライブラリの特長であり、対話的にシミュレーションデータを描画できることがこのライブラリの開発意義である。今年度前半では、VISMO の粒子表示機能を拡充し、表示する粒子の色・大きさを制御可能にした。この開発はデータの表現力を上げ、プラズマシミュレーション以外のシミュレーションへの応用の道を開いた。例えば、名工大の後藤俊幸先生のグループは、エアロゾルから雲粒子生成までのシミュレーションを行っている。粒子の大きさに合わせて色を変えて表示することで、水粒子が衝突・合体成長して雨として降下する過程を調べることに役立つと考えられ、共同研究を後藤先生のグループと開始した。今年度後半では、新たに四面体格子版も開発を行い、等値面、スライス、矢印表示、流線表示を可能とした。このように VISMO の可視化表現の拡張に成功したという点で目標を達することができた。

【物理課題の成果】

・磁気再結合：PASMO コードによる粒子シミュレーションにより、縦磁場が存在する場合の磁気再結合における実効的なイオン加熱機構を調べた。本加熱機構を受けたイオンはリング状の速度分布を形成することが明らかになっている。平成 30 年度は、この加熱機構の磁場成分依存性について取り組み、まず、縦磁場（トロイダル磁場）強度依存性を詳しく調べた。その結果、縦磁場が強くなるにつれて、速度分布構造がリング構造から未完成のリング、すなわち弧状構造となる傾向があることを見出した。このことは、縦磁場が強くなると、（実効的な）イオン温度が低下する傾向にあることを意味する。さらに後期には、反平行磁場（ポロイダル磁場）強度の依存性につ

いて探求を進めた。反平行磁場が強くなると、リコネクションアウトフロー速度が大きくなることに伴い、リング状あるいは弧状速度分布構造の半径が大きくなることを明らかにした。また、この 2 つの依存性を説明できる理論を構築することに成功している。さらに得られたシミュレーション結果を、東京大学の球状トカマク装置 TS-3 等におけるプラズマ合体実験結果と比較し、イオン加熱の縦磁場依存性・反平行磁場依存性がシミュレーションと実験でよく一致することを確かめた。

・周辺領域におけるプラズマ輸送：フィラメント現象の物理課題を扱う p3bd コードでは、これまでに、プロブだけでなくホール（プロブとは逆に、周囲より密度の低いフィラメント構造）の計算も実行できるように改良を行い、プロブ・ホールによる不純物イオン輸送を世界で初めて数値的に示すなどの成果を得てきた。今年度前半は、この不純物イオン輸送の様々な物理パラメータに対する依存性を調べるために非常に多くのパラメータランを行い、①同輸送がフィラメント断面サイズに対して正の相関を持つこと、②同輸送が背景イオン温度に対して弱い負の相関を持つこと、③不純物イオン質量がある閾値を超えると急激に輸送が少なくなることを示した。さらに、今年度の後半においては、フィラメント現象における同位体効果について調べ、その結果、イオン質量増加によるシース効果（フィラメント伝播速度の増加）と分極ドリフト効果（同速度の減少）は打ち消し合うが、粒子旋回運動効果が加わることにより、全体としてはフィラメント伝播速度が減少することを明らかにした。また、粒子旋回運動の効果が、3 次元的な電位構造を通して、フィラメントのダイナミクスに 3 次元的な影響を与えることも見出した。

・高速粒子による波動励起：LHD ではプラズマを立ち上げてプラズマ密度を徐々に上昇させている時に、プラズマから放射される電磁波の周波数が階段状に上昇するという現象が観測されている。この電磁波の励起機構を調べるため、プラズマの密度を増加し続け、そこに、高速粒子を注入し続けるというシミュレーションを開始した。その結果、実験とよく似た、磁場擾乱の周波数上昇を観測した。

このように物理課題の成果では各課題について着実に成果を上げ、当初の目標を達することができた。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

【コード研究・開発】

・PASMO コード：OhHelp ライブラリに対応した開放系境界条件のコード化の取り組みを先述のように進めている。また、PASMO で最も計算効率が低い、粒子位置・速度の更新／電流密度計算のルーチンについて、SIMD 化やソフトウェアパイプラインが有効になるようなアルゴリズムの検討も進めている。開放系境界条件の組み込みを終えたのち、磁気再結合の物理課題に取り組む予定である。以上のように、PASMO コードの開発に関する今年度の計画は順調に進んだ。

・p3bd コード：年度前半は、p3bd の領域分割型分散並列化版コードである up3bd の z 方向周期境界/x 方向反射境界版の開発を行い、その検証作業も含め開発は完了している。年度後半は、up3bd への粒子ソートの導入、up3bd の粒子吸収境界版の開発、VISMO 導入（2019 年度予定）に向けたコード整備を行った。up3bd の粒子吸収境界版についてはその検証作業が残っているが、当初計画に対する進捗率は、全体として、80%以上となった。今後は、その場可視化ライブラリ VISMO の up3bd への導入、up3bd における粒子軌道データ保存ルーチンの開発、実装を進める。

【モデル化研究】

・MHD コード：MUTSU/MINOS コードの機能拡張及び SGS モデルについての改良を着実に進めることができている。今後、プラズマ不安定性の非線形時間発展に使用する予定である。

・階層連結手法：レイリーテイラー不安定性においては、流体コードの成果として、2 流体効果が不安定性成長率を著しく低下させることが解明されている。このことから、流体では記述できない運動論効果は、不安定性成長率に対して、さらに影響を与える可能性が高いことが予想される。そのため、パラメータ繰り込み型の多階層モデルを開発し、それを用いてレイリーテイラー不安定性を調べることが目標となる。前期では、これまで磁気再結合に用いてきた PASMO コードを用いて、後期では、本課題で開発された新しい PASMO コードによってレイリーテイラー不

安定性のシミュレーションを実施している。一方で、様々な条件下でシミュレーションを行い、既存の MHD シミュレーション結果と比較することは今後の課題となっている。この比較により、運動論効果のモデル化へつなげるアウトプットを得ることが期待される。そのため、このトピックについての進捗状況としては、やや遅れていると評価する。

【その場可視化の研究・開発】

・VISMO の研究・開発: その場可視化ライブラリ VISMO で粒子の色・大きさの制御を可能にした。また、カーテシアン以外の座標系の対応するため、四面体格子対応版の開発を行った。等値面、スライス、矢印表示、流線表示が可能となった。四面体以外の座標系を用いているシミュレーションでも、計算格子を四面体に分割できれば使用できるので、トーラス系プラズマシミュレーションなど、VISMO が利用可能なコードがさらに増えることが期待される。今後は、シミュレーションコードとのインターフェイス、点群取得機能の実装などを行う。

【物理課題の成果】

・磁気再結合: 磁気再結合におけるイオン実効的加熱機構について、前期では、縦磁場依存性を、後期には反平行磁場依存性を、粒子シミュレーションで詳細に調べた。それらの依存性を球状トカマク装置におけるプラズマ合体実験で報告されている傾向と比較し、両者はよく合うことを示すことができた。さらに、このことを説明できる理論を構築することにも成功している。このことから、当初目標以上に進捗したと考えている。今後は、リング状あるいは弧状の速度分布関数から駆動されると考えられる不安定性、あるいは粒子間衝突の効果によって、これらの特殊な速度分布構造がどう変化するのかを探求する。また、単純な 1 つのリング状あるいは弧状構造だけではなく、それらが組み合わさった構造も見えているので、それらについても成立過程を調べていく予定である。これによって、よりよい精度で球状トカマクにおけるイオン加熱と比較することに繋がり、より効率的な加熱条件を実験側に提案できることが期待される。さらに、このイオン実効的加熱機構は球状トカマクのような室内実験だけではなく、

地球磁気圏での磁気再結合にも適用できる可能性がある。

・周辺領域におけるプラズマ輸送: 今年度前半は、フィラメントによる不純物イオン輸送の様々な物理パラメータに対する依存性をパラメータランにより示した。今年度後半は、フィラメント現象における同位体効果、そして、粒子運動による 3 次元的效果を明らかにした。これらの詳細な物理機構に関する解析については未だ不十分な点もあるが、当初計画に対する進捗率は、全体として、90%以上となっている。今後は、それら物理機構の解析や、磁力線方向に局在して生成されたフィラメントの時空間ダイナミクスに関する研究を進める。

・高速粒子による波動励起: プラズマ密度の上昇と高速粒子の注入の効果を一層明らかにすることを目指して、現在、波動のスペクトルや高速粒子の速度分布についての解析を進めている。今後、シミュレーション結果と実験結果の比較をして、波の励起機構を解明するとともに、計算モデルを検証する予定である。

【資源の利用状況】

粒子コード及び MHD コードそれぞれについて FX100 でプロダクトランを行っている。また、コードの開発においても資源を活用することができ、順調に開発を進めることができている。資源は有効に活用されており、改めて JHPCN に感謝申し上げる。

【共同研究の進捗】

核融合科学研究所に所属するメンバーでは、定期的な会合を設け、コード開発や研究の進捗状況を報告し合い、停滞している課題があれば、その問題について議論を行っている。遠方の共同研究者とは、メールを使って研究状況を報告して議論を行っている。

【シミュレーション研究の総合的研究基盤の構築に向けた取り組み】

個別の要素技術は着実に開発が進んでいる。VISMO についても具体的な利用に対する要望を取り入れるなど、更なる開発を進めている。今後、基本コードやライブラリの公開等を含め、研究基盤の構築を進めたいと考える。

【今年度の研究計画に対する自己評価】

モデル化研究にやや遅れが見られたが、超並列に対応した粒子コードの開発、物理課題の成果、その場可視化ライブラリの充実など、着実に成果を挙げることができた

7. 研究成果リスト

(1) 学術論文

- S. Usami, R. Horiuchi, H. Ohtani, and M. Den: “Improvement of the Multi-Hierarchy Simulation Model Based on the Real-Space Decomposition Method”, *Plasma* 1, 9 (2018).
- F. Pucci, S. Usami, H. Ji, X. Guo, R. Horiuchi, S. Okamura, W. Fox, J. Jara-Almonte, M. Yamada, and J. Yo: “Energy transfer and electron energization in collisionless magnetic reconnection for different guide-field intensities”, *Phys. Plasmas* 25, 122111 (2018).
- M. Toida, K. Saito, H. Igami, T. Akiyama, S. Kamio, R. Seki: “Simulation Study of High-frequency Magnetosonic Waves Excited by Energetic Ions in Association with Ion Cyclotron Emission”, *Plasma Fusion Res.* 13 (2018) 3403015.

(2) 国際会議プロシーディングス

- S. Usami, R. Horiuchi, H. Ohtani, Y. Ono, M. Inomoto, H. Tanabe: “Particle Simulation Studies on Ion Effective Heating through Merging Plasma”, The 27th IAEA Fusion Energy Conference (FEC2018), TH/P4-9.
- H. Hasegawa, S. Ishiguro: “Ion Inertial Effects on Three-dimensional Filament Dynamics”, 27th IAEA Fusion Energy Conference (2018) TH/P7-12.

(3) 国際会議発表

- S. Usami, R. Horiuchi, H. Ohtani: “Formation of ring-like ion velocity distribution through magnetic reconnection with a guide field”, 19th International Congress on Plasma Physics (ICPP2018), June 4-8, 2018, Vancouver, Canada.
- M. Toida: “Simulation studies of effects of trapped electrons on particle acceleration by a shock wave” 19th International Congress on

Plasma Physics (ICPP2018), June 4-8 (2018), Vancouver, Canada.

- S. Usami, R. Horiuchi, H. Ohtani, Y. Ono: “PIC simulation and extended theory on ion pickup-like heating in guide filed reconnection”, The 2018 US-Japan Workshop on Magnetic Reconnection (Magnetic Reconnection in Space, Solar, Astrophysical, and Laboratory Plasmas) (MR2018), September 4-8, 2018, Princeton, U.S.A.
- H. Hasegawa, S. Ishiguro: “Impurity Ion Transport by Filamentary Plasma Structures”, 23rd International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices, Jun. 17 - Jun. 22, 2018, Princeton University, New Jersey, USA.
- S. Usami, R. Horiuchi, H. Ohtani, Y. Ono, M. Inomoto, H. Tanabe: “Particle Simulation Studies on Ion Effective Heating through Merging Plasma”, 27th IAEA Fusion Energy Conference, Oct. 22-27, 2018, Gandhinagar, Gujarat, India.
- H. Hasegawa, S. Ishiguro: “Ion Inertial Effects on Three-dimensional Filament Dynamics”, 27th IAEA Fusion Energy Conference, Oct. 22-27, 2018, Gandhinagar, Gujarat, India.
- S. Ishiguro, T. Pianpanit, H. Hasegawa, T. Moritaka, Y. Hayashi, N. Ohno, H. Tanaka, S. Kajita, “Plasma structure deformation due to injection of a strong plasma pulse in a detached plasma”, 60th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, November 5-9, 2018, Portland, Oregon, USA.
- H. Ohtani, N. Ohno, H. Miura, S. Usami, S. Ishiguro, R. Horiuchi: “Combination of particle-in-cell simulation with analysis by in-situ and virtual-reality visualization for investigation of plasma physics”, 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS-DPP2018), November 12-17, 2018, The Kanazawa Chamber of Commerce and Industry & Ishikawa Prefectural Bunkyo Hall, Kanazawa, Japan.

・S. Usami, R. Horiuchi, H. Ohtani, and Y. Ono: “Particle Simulation Studies on Effective Ion Heating during Magnetic Reconnection”, 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS-DPP2018), November 12-17, 2018, The Kanazawa Chamber of Commerce and Industry & Ishikawa Prefectural Bunkyo Hall, Kanazawa, Japan.

・S. Usami, R. Horiuchi, H. Ohtani: “Extension of the ion effective heating process during magnetic reconnection with guide field”, The 27th International Toki Conference & The 13th Asia Pacific Plasma Theory Conference (ITC27 & APPTC2018), November 19-22, 2018, Ceratopia Toki, Toki, Japan.

・H. Hasegawa, S. Ishiguro, “Effect of Ion Mass on Plasma Filament Propagation Dynamics”, The 27th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research & The 13th Asia Pacific Plasma Theory Conference, November 19-22, 2018, Toki, Gifu, Japan.

・S. Ishiguro, T. Pianpanit, H. Hasegawa, T. Moritaka, Y. Hayashi, N. Ohno, H. Tanaka, S. Kajita, “Potential Structure in the Detached Plasma Invaded by a Strong Plasma Pulse”, The 27th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research & The 13th Asia Pacific Plasma Theory Conference, November 19 - 22, 2018, Toki, Gifu, Japan.

・N. Ohno, H. Ohtani, K. Kaneko: “In-Situ Visualization Tool: VISMO”, The 27th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research & The 13th Asia Pacific Plasma Theory Conference, November 19 - 22, 2018, Toki, Gifu, Japan.

・M. Toida, H. Igami, K. Saito, T. Akiyama, S. Kamio, R. Seki: “Particle simulation of stair-like frequency chirping in lower-hybrid resonance range caused by energetic ions”, The 27th International Toki Conference on Plasma

and Fusion Research & The 13th Asia Pacific Plasma Theory Conference, November 19 - 22, 2018, Toki, Gifu, Japan.

・H. Ohtani, Y. Miyake, H. Nakashima, R. Horiuchi, S. Usami: “Optimization of plasma electromagnetic particle simulation code PASMO”, The 1st R-CCS International Symposium, Feb. 18-19, 2019, Kobe, Japan.

(4) 国内会議発表

・大野暢亮, 大谷寛明, “In-Situ 可視化ツールの開発”, 第 23 回計算工学講演会、2018 年 6 月 6 日～8 日、ウイング愛知(名古屋市).

・長谷川裕記, 石黒静児: 「不純物イオン輸送におけるプラズマフィラメントの効果」、第 12 回核融合エネルギー連合講演会、2018 年 6 月 28 日～29 日、ピアザ淡海(滋賀県立県民交流センター)(大津市).

・樋田美栄子, 斎藤健二、伊神弘恵、秋山毅志、關良輔、神尾修治: 「高速イオンによる低域混成波不安定性のシミュレーション」第 12 回核融合エネルギー連合講演会、2018 年 6 月 28 日～29 日、ピアザ淡海(滋賀県立県民交流センター)(大津市).

・樋田美栄子, 伊神弘恵、斎藤健二、秋山毅志、關良輔、神尾修治: 「高エネルギーイオンが励起する低域混成波とイオンサイクロトロン波のシミュレーション」日本物理学会秋季大会、2018 年 9 月 9 日-12 日、同志社大学(京都市).

・長谷川裕記, 石黒静児: 「プラズマフィラメントによる径方向不純物イオン輸送の粒子シミュレーション」、プラズマシミュレータシンポジウム 2018、2018 年 9 月 13 日～14 日、核融合科学研究所(土岐市).

・大野暢亮, 大谷寛明, 三浦英昭: 「ベクトル計算機上での In-Situ 可視化の試み」、プラズマシミュレータシンポジウム 2018、2018 年 9 月 13 日～14 日、核融合科学研究所(土岐市)(招待講演).

・金子貢士, 大野暢亮, 大谷寛明: 「VR 装置による In-Situ 可視化結果の表示」、プラズマシミュレータシンポジウム 2018、2018 年 9 月 13 日～14 日、核融合科学研究所(土岐市).

・樋田美栄子: 「高速イオンが励起するイオンサイクロトロン波と低域混成波との粒子シミュレーショ

ン」, プラズマシミュレータシンポジウム 2018, 2018 年 9 月 13 日-14 日、核融合科学研究所(土岐市).

・宇佐見俊介、堀内利得、大谷寛明:「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」、プラズマシミュレータシンポジウム 2018、2018 年 9 月 13 日-14 日、核融合科学研究所(土岐市).

・宇佐見俊介、堀内利得、大谷寛明:「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」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)、2018 年 11 月 2 日、名古屋大学(名古屋市).

・石黒静児、ピアンパニット・テラサーン、長谷川裕記、森高外征雄、林祐貴、大野哲靖、田中宏彦、梶田信:「中性ガスプラズマ境界領域への高エネルギープラズマ流入に伴う電位構造形成」、第 35 回プラズマ・核融合学会年会、2018 年 12 月 3 日-6 日、大阪大学(大阪府吹田市).

・長谷川裕記:「プラズマにおける多階層複合シミュレーション～オーロラと核融合境界層領域～」、「自然科学における階層と全体」シンポジウム、2019 年 1 月 10 日-12 日、犬山国際観光センターフロイデ(愛知県犬山市).

・長谷川裕記、石黒静児:「プラズマフィラメントダイナミクスにおける 3 次元効果」、日本物理学会第 74 回年次大会、2019 年 3 月 14 日-17 日、九州大学(福岡市).

・宇佐見俊介、堀内利得、大谷寛明:「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」、日本物理学会第 74 回年次大会、2019 年 3 月 14 日-17 日、九州大学(福岡市).

(5) その他(特許, プレス発表, 著書等)

・プラズマ・核融合学会 編、佐野史道 監修、岸本泰明、堀内利得、石黒静児、州鎌英雄、矢木雅敏、今寺賢志、長友英夫、内藤裕志、渡邊智彦、三浦英昭、藤堂泰、滝塚知典、福山淳、長谷川裕記、伊藤篤史:「プラズマシミュレーション 多階層複雑現象の解明へ」、京都大学学術出版会(2018 年 12 月).