

jh210005-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

核融合プラズマでは微視的物理が装置全体に影響を与える現象がある。微視的物理をプラズマ物理における基礎的過程として捉え、粒子コードによって微視的物理機構を解明するため、(1)粒子コード開発、(2)粒子コード結果のモデル化研究、(3)その場可視化研究を行う。今年度は、(1)ループ分割や粒子データ配列のスレッド並列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、(2)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、(3)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。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

名古屋大学 京都大学

(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、PIC 法による粒子コード開発・高速化・可視化研究

大野暢亮 (兵庫県立大): その場可視化研究

宇佐見俊介 (核融合研): PIC 法による粒子コード開発・磁気再結合研究

長谷川裕記 (核融合研): PIC 法による粒子コード開発・周辺プラズマ研究

樋田美栄子 (核融合研): PIC 法による粒子コード開発・高速粒子による波動励起の研究

森高外征雄、沼波政倫 (核融合研): ジャイロ運動論による研究開発

三浦英昭 (核融合研)、深沢圭一郎 (京大)、小川智也 (北里大): 流体シミュレーションと粒子シミュレーションの比較研究

中島浩 (京大): 動的負荷分散ライブラリ開発

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

石黒静児、堀内利得 (核融合研): 問題設定・結果評価

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やプラズマ中の高速粒子が及ぼす影響の理解も必要である。しかし、磁気再結合によるディスラプション現象やブロボのプラズマ輸送、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。また、大規模シミュレーション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、先の微視的物理をプラズマ物理における基礎的過程として捉え、①粒子コードの研究開発及び粒子コードで微視的物理機構を研究する。②巨視的なシミュレーションに

組み込む微視的現象のモデル化を研究する。③ 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を行う。これにより核融合プラズマの閉じ込め性能改善へ寄与することを目的とする。

今年度の研究目的は以下の通りである。

- ① 粒子コード up3bd・PASMO の開発では 20 年度に FX1000 への移植を行ったが、データ構造の変更などを検討してさらに最適化を進める。up3bd コード開発では領域分割に応じた初期密度分布設定ルーチン開発を進める。また、ジャイロ運動論モデルに基づく粒子コード X-point Gyrokinetic Code (XGC) の開発を進める。粒子モデルによるプラズマ基礎研究では、磁気再結合で発生する異常な速度分布形成をさらに詳細に調べ、プロブ現象の初期条件に対する依存性を調べて運動論的效果の研究を進め、高速粒子による波動励起の長時間非線形発展を更に明らかにする。
- ② 粒子モデルと流体モデルの運動論的スケールでの結果の差異が巨視的スケールでどのように波及するか調べるため、完全 2 流体モデルの開発及び安定化技法の調査研究を行う。
- ③ その場可視化ライブラリ VISMO を引き続き開発する。シミュレーションデータの統計量を可視化する機能を追加する。

3. 当拠点公募型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ウ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

① PASMO コード及び up3bd コードの開発では、

- FX1000 への移植を行った。up3bd コードでは、コードの書き換えなどは行わず名大計算機センターが用意したモジュールを使って、FX100 より 2.5~3 倍程度の性能向上となった。PASMO コードでは、最も計算効率が悪い、粒子の Pusher 及び Gather プロセスのアルゴリズムを見直し、1.67 から 1.78 倍の性能向上となった。
- ② 流体モデルと粒子モデルにおける運動論的スケールの影響を調べるため、差分法によるイオン・電子完全 2 流体シミュレーションコードの開発を進め、変数の持ち方の変更などコードのリファクタリングを行った。
- ③ その場可視化ライブラリ VISMO の FX1000 への移植及び可視化パラメータ設定ツールの開発を行った。

物理研究では、磁気再結合現象における疑似的マクスウェル速度分布構造形成を発見した。プラズマ輸送の物理研究では、フィラメントの伝播速度に対する同位体効果について観測値が理論値と一致する結果が得られた。高速粒子による波動励起の研究では、プラズマ密度が増えると低域混成波の振幅が小さくなるという実験と一致する結果が得られた。

5. 今年度の研究成果の詳細

【コード研究・開発】

Particle-in-Cell (PIC) 法に基づくプラズマ粒子シミュレーションコードの開発として、up3bd コード及び PASMO コードの研究・開発を推進した。

up3bd コードは、① 3 次元空間における多数のプラズマ粒子（領域分割型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、② x 軸方向の片側の境界、及び、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、などが特徴である。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 up3bd コードの開発意義である。本年度は、2次元領域分割化コードの開発と VISMO の挙動も含めたその検証を進めた。本コードでは、可用性を鑑み、1次元ずつ粒子データの転送を行う実装としたが、検証計算においては、2次元同時に転送する場合に比して、計算速度においても優れていることを確認した（表1）。また、本コードで高コストとなっている粒子存否判定（粒子がプロセスの受け持つ領域に存在するかどうかを判定する）サブルーチンについて、①冗長計算の削除、②ループ分割、③粒子データ配列のスレッド並列用次元の要素数の変更による最適化を行った（表2）。①では壁に吸収された粒子の速度を0としていたが不要な計算であるため、削除した。②の対象ループでは次の漸化式を含む計算をしている。

```

a(1)=b(1)
do i=2, N
  a(i) = a(i-1) + b(i)
end do
do i=1, N
  a(i) = a(i)*b(i)
end do
    
```

FX1000 向けのコードではこの前半の漸化式計算を

```

s = 0
do i=1, N
  s = s+ b(i)
  a(i) = s
end do
    
```

表1: 1次元ずつ転送と2次元同時転送の比較（最適化後（後述）コードを使用。システムサイズ 64×64×256、1セルあたり粒子数 144 個、4ノード、16 MPI プロセス使用。）

	1次元ずつ	2次元同時
計算時間比	1.00	1.19

表2: 粒子存否判定サブルーチンの最適化結果（as is を1とした計算時間比を示す。システムサイズ等は表1と同じ。ただし、領域分割は1次元方向のみ。丸数字は本文を参照。）

	コード全体	ルーチンのみ
as is	1.00	1.00
①	0.849	0.621
①+②	0.822	0.571
①+②+③	0.662	0.229

のように書き換えている。上記の例では1つの配列 b(i) での計算を示しているが、実際のサブルーチンでは複数の配列で行っていたため、1つの配列のみ含むループになるように分割した。③では粒子配列のスレッド並列用次元の要素数を12から36に増やした。これは上記の例のNが小さくなって、キャッシュに載りやすくなり、効率化が実現したと推測される。2次元領域分割に対応した初期粒子分布設定ルーチンについては、一旦、従前ルーチンにより粒子位置を設定したのちに、粒子データ転送ルーチンを流用して、粒子位置に対応したプロセスに粒子データを移動させることにより実現した。ただ、この方法では、システム中央付近を受け持つプロセスに粒子データが集中する（最大2倍程度になる）ときがあり、それに備えて余分に粒子データのバッファを用意しておく必要が生じる。そこで、順方向にのみ粒子データを転送する専用の転送ルーチンを用意することにより、メモリ使用量の増加を防いだ。

PASMO コードは、磁気再結合研究のため2次元あるいは3次元の電磁粒子シミュレーション

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。本年度は、up3bd コードで採用されている最適化を PASMO コードに適用した。具体的には、電流密度計算での作業配列への足しこみで、従来はスレッド並列用の次元を設定して、全粒子による足しこみ終了後、スレッド並列の次元に対する累積計算を行っていたが、スレッド並列用の次元をなくし、OpenMP の reduction 指示節を用いる足しこみに変更した。これにより 1.2%程度の性能向上となった。これはスレッド並列次元に対する累積計算が不要になり、効率化された OpenMP の reduction 機能が効いたと考えられる。

XGC コードは、ジャイロ運動論に基づく PIC コードであり、荷電粒子のジャイロ運動を粗視化することで核融合炉装置スケールの運動論的現象を取り扱うことができる。ジャイロ中心の軌道を計算粒子で表し、その空間分布に基づいた静電場もしくは電磁場の計算を非構造格子で行う。本コードは、PIC 法と有限要素法の併用により、装置形状に合わせた周辺プラズマの運動論シミュレーションを実現でき、軸対称な磁場配位（トカマク配位）を想定してプリンストンプラズマ物理研究所を中心に開発されてきた。我々は、XGC を非軸対称な核融合装置、すなわち大型ヘリカル装置（日本）をはじめとするヘリカル（ステラレータ）核融合炉に適用するための国際共同研究を進めており、非軸対称な磁場配位における核融合炉装置スケールの運動論的現象を取り扱えるようにすることが本コードの開発意義である。ヘリカル（ステラレータ）核融合炉では、3次元形状を持つ外部コイルのみで閉じ込め磁場を作ることができることから、最近では大型装置 Wendelstein-7X（ドイツ）の実験が開始される

など有力な閉じ込め方式の一つとなっている。

ヘリカル核融合炉では、トーラス方向の構造を持つ三次元磁場配位を用いてプラズマを閉じ込めるが、閉じ込め磁場と真空容器との間には、外部コイルに接続する開いた磁力線が複雑に絡み合った状態になっている。本年度は、ジャイロ運動論モデルをヘリカル核融合炉特有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[3, 11]。一つは、非構造格子の形成に関連したもので、外部コイル形状に合わせた二次元曲面を数値最適化で生成するというものである。この曲面は磁力線に対し近似的に垂直になっており、この曲面上に非構造格子を生成することで、静電場（または電磁場）の効率的な計算が可能になる。もう一つは、静電場構造を求めるためのジャイロ運動論ポアソン方程式を任意の磁場構造に対して計算できる反復解法を開発したというものである。方程式に含まれる磁力線平均項が密行列を生成するが、本手法では適切な前処理と疎行列に対する高速な反復解法を組み合わせることで解を求めることができる。これまでに開発した計算手法を用いることで、世界的にも例がなかったヘリカル核融合炉周辺領域へのジャイロ運動論の適用が現実的なものになると期待される。また、大型ヘリカル装置の炉心領域への応用として、大域的な径電場がもたらす水素同位体効果（イオン熱拡散係数に対する質量数依存性）を調べ、大域的な径電場、または複数イオン種の効果によって、最近の重水素実験で観測されているものと定性的に類似した質量数依存性が実現することをあきらかにした[6, 15]。

【モデル化研究】

2021 年度の研究計画は、イオン・電子完全 2 流体モデルについて、既存シミュレーションコードをベースに開発作業を進めるとともに、シミュレーションの安定化のための技法等の調査研究を進めることであった。

Braginskii による古典的なイオン・電子完全 2 流体モデル (Rev. Plasma Physics 1, 1965)

を雛形として、保存型式でコードの実装を進めている。また、粒子シミュレーションとのハイブリッド化を前提として、PIC 部分のコード開発も並行して行っている。このようなコード開発は、部分的な PIC シミュレーション情報を流体モデルに反映させて流体モデルの輸送係数を適合させることを目指すものであり、本コードの開発意義である。

他方、安定化のための技法の調査研究として、既存の拡張 MHD シミュレーションコードを用いて、人為的に付加した超粘性項による安定化の研究を行った。超粘性による安定化は、古くから用いられている確立された手法であり、プラズマの運動が単純である場合には安定化のために良好な動作を示す。しかし、イオンスケールと電子スケールへのカットオフスケールの設定について全く任意であることも良く知られている。拡張 MHD モデルによるシミュレーションからも、特に電子スケールに対する超粘性の設定には、注意が必要であることが確認された。今後は、数値解に対して動的に超粘性係数を適合させる手法について調査が必要である。

【その場可視化の研究開発】

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実用意義である。

今年度は、VISMO ライブラリを公開した[23]。また、シミュレーション実行中に統計量をグラフ化する機能を作成した。対象とするデータは、3次元データではなく、1次元及び2次元のデ

ータであり、描画のための計算負荷は低い。そこで、独自に描画ルーチンを作成せず、Python の Matplotlib を利用し、グラフ描画する方針にした。また、本機能のみを使用する場合も考慮し、VISMO とは切り離れた独自のライブラリとした。可視化するデータは特定の物理量に限定せず、また描画方法も Matplotlib を利用するので、ヒストグラムや散布図などさまざまなグラフ化が可能である。作成したライブラリは、データを保存、Python スクリプトを生成する。そのスクリプトがデータを読み込んで可視化、グラフ画像を保存する。実行するスパコンが Python をサポートしていない場合、データと可視化スクリプトを保存し、ポストプロセスでユーザの PC で実行することも可能である。

【物理課題の研究成果】

磁気再結合研究では、疑似マクスウェル速度分布が、幅を持つリング（円環）型の速度分布の一形態であり、様々な速度を持ったイオンがジャイロ運動をすることによって形成されることを突き止めた[17]。この事実から理論的に、有限な幅を持つリング型速度分布を正確に表す関数を導き出すことに成功した[5]。さらに導き出した関数から、速度分布の形状がリング型（中心に穴を持つ）か、疑似マクスウェル型（山型）かを分ける条件を定量的に求めた[5]。様々な条件で粒子シミュレーションを行い、この条件が正しいことを確かめた。一方で、イオンの三日月型速度分布を見出し、これもリング型分布の一種であることを明らかにした。電子の三日月型速度分布は地球磁気圏の人工衛星で観測され、理論も提示されており、その理論が、磁場形状が大きく異なる状況のイオンにも拡張できることを示した[18]。これにより、特異な形状の速度分布の体系化が完成に近づきつつある。

周辺プラズマ輸送の物理研究では、up3bd コードに実装された終端板に対して斜めの磁力線、及び、プロブを設定する機能を用いてプロダクトランを行い、終端板の傾斜の効果につい

て解析を進めた。その結果、傾斜が強くなるにつれて、伝播速度が速くなることがわかった。この速度上昇は、磁気プレシースによるデバイシースの入口の密度低下に起因して、プロブ中の電場が強くなることによるものであると考えられる[12, 20]。

高速粒子による波動励起の研究では、低域混成波不安定性について高速粒子を注入し続ける開放系シミュレーションを行った。高速粒子の注入効果によって、幅広い波数の低域混成波が励起し、イオンの加速を促進することを明らかにした[13, 14]。この機構は、地球磁気圏における酸素イオンの加速などに寄与している可能性がある[4]。また、高速粒子注入モデルを用いて、低域混成波とそれよりも高い波との非線形結合を調べる研究も開始した。さらに、宇宙と核融合のプラズマは、どちらも多種類のイオンを含むことから、シミュレーションコードを多種類イオンプラズマ用に拡張した。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

【コード研究・開発】

up3bd コードの開発では、2次元領域分割化コードの開発とVISMOの挙動も含めたその検証、FX1000におけるコード最適化、2次元領域分割に対応した初期粒子分布設定ルーチンの開発などを実施し、当初計画に対する進捗率は、全体として80%弱となっている。今後は、開発途上のルーチン群の開発を継続するとともに、リアル粒子シミュレーションを目指し、素過程（原子分子過程、クーロン衝突）モデル導入の検討を進める。

PASMO コードの開発では up3bd コードを参考にコードの最適化を行うことができたため、当初計画通りの進捗が得られた。今後は最もネックとなっている電流密度の足しこみ計算のアルゴリズム変更などで更なる最適化を行う。

XGC コードでは、本年度の開発により、ジャイロ運動論モデルのヘリカル核融合炉周辺領域への適用における最大の難点であった静電

場計算に対して一定の目処が付き、今後の周辺プラズマ現象への応用につながるものと期待される。また、学術論文1本[3]、国際会議(査読有)1本[6]、国際会議(査読無、招待講演1本を含む)2本[11, 15]を発表することができたため、進捗100%であり、当初計画通りである。

【モデル化研究】

2021年度の計画のうち、コード開発部分の進捗は、当初想定していた計画に比べて50%程度の進捗である。これは、流体部分の開発に比べて、粒子部分の組み込みの開発工程が多く、この点で遅れが生じたためである。今後は粒子部分の組み込みを急ぐ必要がある。他方、安定化技法の調査については、概ね想定していた通りの進捗と結果が得られた。今後の展望として、解適合型の安定化技法の調査を進める予定である。

【その場可視化の研究開発】

その場可視化ライブラリVISMOを公開することができ[23]、年度始めに設定した目標は、達成されたと考える。今後は、VISMO側で使用するメモリ量の削減などに取り組む。

【物理課題の研究成果】

磁気再結合研究では、当初予定したパラメータサーベイ回数を大きく超えた回数の計算を行うことができ、特異な速度分布における種類毎の形成条件を詳しく調べ、特に疑似マクスウェル速度分布について定量的な知見を得ることができ[5, 17]、特異な速度分布の体系化という目標にさらに近づいた。加えて、疑似マクスウェル速度分布の理論構築を通して、幅を持つリング型速度分布を正確に表す関数式を世界で初めて導出したことは、リング速度分布から駆動される不安定性研究を大きく進めることにつながる成果であり、計画以上の進捗である[5]。上記をはじめとする進捗によって、学術論文2本[1, 5]、国際会議(査読有)2本[7, 8]、国内会議2本[17, 18]を発表できた。その中でも特に、プラズマ・核融合学会年会で、当初計画通りに、特異な速度分布に着目した本トピック

クスと、人工衛星による速度分布直接観測や室内実験でのプラズマ加熱の解釈などといった連携について提案を行うことができた[18]。以上から、進捗状況は 100%以上である。今後は、その提案した連携を進める他、リングや疑似マクスウェル速度分布の課題をクーロン衝突や中性粒子との衝突が効く場合の磁気再結合へと拡張する。

周辺プラズマ輸送の物理研究では、up3bd コードに実装された終端板に対して斜めの磁力線、及び、プロブを設定する機能を用いてプロダクトランを行い、終端板の傾斜の効果について解析を進めた。学術雑誌 1 本[2]、国際会議(査読有)2本[9, 10]、国際会議(査読無)1本[12]、国内会議 3 本[19-21]を発表できた。当初計画に対する進捗率は、全体として 60%程度となっており、今後は、実質量比の計算によるフィラメント輸送における同位体効果の解析や、フィラメント発生過程などについて研究を行っていききたい。

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。実験との比較は十分には進められなかったが、本年度に得られた新たな知見は今後の更なる研究の発展につながるものであり、査読付き論文 1 本[4]、国際会議(査読無) 2 本[13, 14]、国内会議 1 本[16]を発表することもできたため、進捗状況は 70%程度である。

各課題の進捗状況は以上の通りで、やや進捗に遅れが見られる課題がある一方、100%以上の進捗を見せた課題もある。それぞれの課題で具体的な成果を得ることができ、課題全体としては当初計画通りに研究を進めることができたと考える。

7. 研究業績一覧

(発表予定も含む。投稿中・投稿予定は含まない)

(1) 学術論文 (査読あり)

[1] C. Z. Cheng(+), S. Inoue, Y. Ono, H. Tanabe, R. Horiuchi, and S. Usami, “Plasma heating and current sheet structure in anti-parallel magnetic reconnection”, *Phys. Plasmas* (28), p.072101, 2021

[2] H. Hasegawa, H. Tanaka, S. Ishiguro: “Linear analysis of cross-field dynamics with feedback instability on detached divertor plasmas,” *Nuclear Fusion* (61), p.126005, 2021

[3] T. Moritaka et al., “Improving Gyrokinetic Field Solvers toward Whole-Volume Modeling of Stellarators”, *Plasma and Fusion Research* (16), p.2403054, 2021

[4] T. Koatni, M. Toida, T. Moritaka, and S. Taguchi, “PIC simulation of energetic-ion injection effects on nonlinear development of lower-hybrid wave instabilities,” *J. Phys. Soc. Jpn.* (90), p.124501, 2021

[5] S. Usami and R. Horiuchi: “Pseudo-Maxwellian Velocity Distribution Formed by the Pickup-like Process in Magnetic Reconnection,” *Front. Astron. Space Sci* (9), p.846395, 2022

(2) 国際会議プロシーディングス (査読あり)

[6] T. Moritaka et al., “Isotope Effects in Ion Temperature Gradient Modes with Radial Electric Field in Large Helical Device”, 28th IAEA Fusion Energy Conference, Virtual Event, May 10-15, 2021

[7] S. Usami, R. Horiuchi, T. Moritaka, Y. Ono, M. Inomoto, and H. Tanabe, “Particle Simulation on Merging Processes of Two Spherical Tokamak-Type Plasmoids in a Conducting Vessel”, 28th IAEA Fusion Energy Conference, Virtual Event, May 10-15, 2021

[8] S. Usami, R. Horiuchi, T. Moritaka, and Y. Ono, “Studies on ion heating through the merging of spherical tokamaks by means of particle simulations”, 40th JSST Annual International Conference on Simulation Technology, Online, Sep. 1-3, 2021

[9] H. Hasegawa, H. Tanaka, S. Ishiguro, “Linear analysis of cross-field dynamics with feedback instability on detached divertor plasmas,” 28th IAEA Fusion Energy Conference, Virtual Event, May 10-15, 2021

[10] H. Hasegawa, S. Ishiguro, “Development of the efficient electrostatic plasma particle simulation code for the study of fusion boundary layer plasmas,” 40th JSST Annual International Conference on Simulation Technology, Online, Sep. 1-3, 2021

(3) 国際会議発表 (査読なし)

[11] T. Moritaka et al, “Electrostatic potential calculations for whole-volume gyrokinetic modeling of stellarators”, 47th European Physical Society Virtual Conference on Plasma Physics, Online, June 21-25, 2021

[12] H. Hasegawa, S. Ishiguro: “3D-PIC simulation for a filamentary plasma structure ended by tilted plates,” 30th International Toki Conference, Online, Nov. 16-19, 2021

[13] T. Koatni, M. Toida, T. Moritaka, and S. Taguchi, “Simulation study of energetic-ion injection effects on magnetosonic and lower-hybrid instabilities,” 30th International Toki Conference, Online, Nov. 16-19, 2021

[14] T. Kotani, M. Toida, T. Moritaka, S. Taguchi, “Parametric study of energetic-ion injection effects on ion-ring

instabilities: 1D-PIC simulation,” AGU Fall Meeting, Online, Dec. 13-17, 2021

[15] T. Moritaka, H. Sugama, M. Cole et al, “Isotope effects on ion temperature gradient mode with radial electric field in Large Helical Device” (invited), 30th International Toki Conference, Online, Nov. 16-19, 2021

(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, 高速粒子による低域混成波不安定性の非線形発展及びイオン加速に対する高速イオン注入の影響, プラズマ・核融合学会年会, オンライン, 2021 年 11 月 22 日-25 日

[17] 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疑似マクスウェル速度分布の形成」、プラズマシミュレータシンポジウム 2021、オンライン、2021 年 9 月 16 日-17 日

[18] 宇佐見俊介、銭谷誠司、堀内利得、大谷寛明:「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」、第 38 回プラズマ・核融合学会年会、オンライン、2021 年 11 月 22 日-25 日

[19] 長谷川 裕記, 石黒 静児, “境界領域輸送ダイナミクス研究のための 3 次元静電粒子コードの開発,” プラズマシミュレータシンポジウム 2021、オンライン、2021 年 9 月 16 日-17 日

[20] 長谷川 裕記, 石黒 静児, “プラズマファイラメント輸送ダイナミクスにおける終端板の傾斜の効果,” 第 38 回プラズマ・核融合学会年会、オンライン、2021 年 11 月 22 日-25 日

[21] 長谷川 裕記, “連結階層シミュレーションと劇的変容現象,” (招待講演)、「自然科学における階層と全体」シンポジウム、オンライン、2022 年 1 月 6 日-7 日

[22] 大野暢亮, “In-situ 可視化ライブラリ VISMO の紹介”(ポスター), プラズマシミュレ

ータシンポジウム 2021、オンライン、2021 年 9
月 16 日-17 日

(5) 公開したライブラリなど

[23] その場可視化ライブラリ VISMO:

<https://vizlab.sakura.ne.jp/ja/vismo.html>

(6) その他(特許, プレスリリース, 著書等)