

jh200003-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

磁場閉じ込めプラズマにおいて微視的物理が装置全体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のため、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。本年度は、PASM0 コード及び up3bd コードの FX1000 への移植・最適化を行った。イオンと電子による完全 2 流体モデルのための MHD コードのリファクタリング、その場可視化ライブラリ VISM0 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擬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の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。

1. 共同研究に関する情報

片桐孝洋（名大）：FX1000 での最適化・実行支援

(1) 共同研究を実施した拠点名

名古屋大学 京都大学

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も必要である。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、高速粒子が励起する波動、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運減のための非接触プラズマ過程、不純物輸送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、粒子と波の相互作用やシース電位との自己無撞着な電流系の計算を行い、さらに、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。その際に用いる粒子モデルでは膨大な数の粒子運動を計算する必要があり、巨視的な時空間スケールを扱うことが困難である。

(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）：可視化の研究・開発

沼波政倫、森高外征雄（核融合研）：粒子コードの高速化

樋田美栄子、宇佐見俊介、長谷川裕記（核融合研）：粒子コードの高速化、物理課題研究

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、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

本研究課題では、磁気再結合、高速粒子による波動励起、プロブ現象のように、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を、プラズマ物理における基礎的

な過程として捉え、粒子シミュレーションによってその発生機構の解明を行う。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、より予測性の高い巨視的シミュレーションを実現することを目指す。また、シミュレーションデータの可視化解析を効率よく行うためのその場可視化の研究・開発を行う。そのために、次の3つの課題で、以下の研究・開発を今年度は行った。

課題①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：粒子コードにはメモリへのランダムアクセスや計算負荷の不均衡など、計算効率を悪化させる要因が多々ある。超並列計算機で十分な実行性能を得るため、粒子コードの新たなアルゴリズムや計算手法の研究を進める。また、開発したコードを使って核融合プラズマにおける物理課題解決のためシミュレーションを実行する。

2020年7月より稼働開始した名古屋大学の「TypeI サブシステム(FX1000)」で、本課題で開発している粒子コード PASMO や up3bd コード等の最適化を行う。また、PASMO コードを参考に、up3bd コードの多次元領域分割化を検討する。物理課題研究では、磁気再結合におけるリング状のイオン速度分布による実効的加熱の探求、プロブ現象におけるフィラメント発生過程やフィラメントの密度勾配に起因する不安定性の研究、高速粒子による波動励起の研究では波の飽和と減衰の機構を解析する。

課題②巨視的シミュレーションに活用するための微視的現象のモデル化研究：たとえ超並列化した粒子コードでも装置中のプラズマ全体を扱うことは現在・近未来のスーパーコンピューターでも不可能である。予測性の高い巨視的シミュレーション実現のための微視的現象のモデル化研究を行う。

今年度は、流体モデルと粒子モデルにおける運動論的スケールの結果へ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行う。

課題③大規模シミュレーションデータ解析のためのその場可視化の研究・開発：ストレージ制限などから計算したデータをすべて保存できない大規模シミュレーションに対して、データの可視化解析を行う方法の一つとして、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。

今年度は、CGの知識がないシミュレーション研究者でも、その場可視化ライブラリ VISMO の設定ファイルを容易に記述するためのツール開発を進める。

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 コードの最適化では、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開発を進めた結果、実行時間がオリジナルに比べ 53.9%まで改善することができた。up3bd コードの開発では、その場可視化ライブラリ VISMO の導入を行い、また、粒子吸収境界（z 軸方向の両側の境界を粒子吸収境界とした）の開発・検証を行い、良好な結果を得た。さらに、z 方向に局在するプロブも初期設定可能な初期粒子配置ルーチンを開発・実装した。モデル化研究では、イオンと電子による完全2流体モデルのための MHD コードのリファクタリングを進めた。その場可視化の研究では、VISMO の四面体格子版の開発及びユーザビリティ向上を行った。物

理研究では磁気再結合におけるイオンの実効的加熱機構のトロイダル磁場依存性の機構を解明し、プラズマ輸送の物理研究ではブロボ輸送のみではなくホール輸送における同位体効果の影響を調べた。高速粒子による波動励起では低域混成波とイオンサイクロトロン波の非線形結合によって磁場擾乱の周波数が上昇することを示した。

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。

up3bd コードの特長としては、①PASMO 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（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、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 up3bd コードの開発意義である。

本年度は、名古屋大学 Type I サブシステム（FX1000）への PASMO コードと up3bd コードの移植作業を行った。コンパイルオプション-Qt を -Nlst=t へ変更するのみで、両コードとも FX1000 でのコンパイル及び実行ができた。以下の性能調査での OpenMP は富士通ライブラリを使用した。

PASMO コードの性能比較を、1 セル当たりの粒子数を電子とイオンを合わせて 60 個、グリッド数（XYZ 方向）を $130 \times 130 \times 130$ で、1,000 ステップまでのシミュレーション本体（即ち、粒子と電磁場の更新、電流密度計算）での計算経過時間で比較した。ノード数を 256、MPI プロセス数を XYZ 方向にそれぞれ $8 \times 8 \times 8$ で分割して、スレッド数を 16 で実行したところ、FX100 での計算時間は 13.05 秒であった。同じ条件で FX1000 で実行すると、推奨されたプロセス・スレッド配置方法ではないため（今回の計算は 1 ノードあたり 2 プロセス、1 プロセスあたり 16 スレッドとなる）、計算時間は 19.76 秒であった。そこで、up3bd コードの FX1000 での実行条件を参考に、推奨されている 1 ノードあたりのプロセス数を 4 となるように（即ち、1 CMG あたり 1 プロセス）、1 プロセスあたり 8 スレッドにして、計算総コア数が FX100 と同じ 8,192 になるように、ノード数を 256、MPI プロセス数を XYZ 方向にそれぞれ $8 \times 8 \times 16$ として、スレッド数を 8 として実行したところ、計算時間は 18.47 秒であった（この場合をケース 1 とする）。また、FX1000 では 1 CMG あたり、12 の計算コアが搭載されているので、同ノード数、同 MPI プロセス数でスレッド数を 12 にしたところ（計算総コア数は 12,288 である）、計算時間は 13.24 秒となった（この場合をケース 2 とする）。計算グリッド数に対する MPI プロセス数の割り当て方法が FX100 の場合と FX1000 の場合とでは異なるので、単純な比較はできないが、計算時間だけを見ると、FX1000 で計算総コア数を 1.5 倍にしてようやく FX100 と同程度の計算速度となった。

そこで、最適化を行うため、PASMO コードで最も計算効率が悪い、粒子の Pusher 及び Gather プロセスを見直した。Pusher プロセスでは格子点で定義されている電磁場のデータから重み関数をつけて粒子の位置での電磁場の値を計算する。Gather プロセスでは粒子位置の更新前と更新後の重み関数の差から、格子点で定義される電流密度を計算する。オリジナルのコードではこの2つのプロセスを粒子番号に対する DO 文 1 回 (OpenMP でスレッド並列化されている) で以下のように実行していた。

```
!$OMP DO
do i=1,N
  粒子位置から最近接格子点の計算
  粒子の重み関数の計算 (更新前)
  格子点上から粒子位置での電磁場の計算
  粒子位置と速度の更新
  更新後の粒子位置から最近接格子点の計算
  粒子の重み関数の計算 (更新後)
  更新前後の重み関数の差を計算
  格子点上の電流密度計算
end do
!$OMP END DO
```

ここで、N は粒子数である。

そこで、以下のように、do 文を粒子位置と速度の更新を行う部分と、電流密度を計算する部分に分けた。

```
!$OMP DO
do i=1,N
  更新前の粒子位置の記録・保存
  粒子位置から最近接格子点の計算
  粒子の重み関数の計算 (更新前)
  格子点上から粒子位置での電磁場の計算
  粒子位置と速度の更新
end do
!$OMP END DO
!$OMP DO
```

```
do i=1,N
  更新前の粒子位置から最近接格子点の計算
  粒子の重み関数の計算 (更新前)
  更新後の粒子位置から最近接格子点の計算
  粒子の重み関数の計算 (更新後)
  更新前後の重み関数の差を計算
  格子点上の電流密度計算
end do
!$OMP END DO
```

このアルゴリズム変更を行ったところ、ケース 1 での計算時間が 10.37 秒、ケース 2 での計算時間が 7.92 秒となった。FX100 の時と比較して、 $13.05/10.37=1.26$ 倍の性能向上を実現した。また、アルゴリズムの変更前後では、ケース 1 で $18.47/10.37=1.78$ 倍、ケース 2 で $13.24/7.92=1.67$ 倍の性能向上となった。なお、変更後のアルゴリズムでは、更新前の粒子位置の記録・保存のため、粒子数 \times 3 次元の大きさのメモリを必要とするが、別途用意している、粒子番号のソーティングを行うためのメモリを利用しているので、メモリ総利用量はアルゴリズム変更前後で変わらない。

up3bd コードでは、コードの書き換えなどは行わずに計算機センターが用意したモジュールを使って (FX100 では FFTW は自身でコンパイルしたものを利用したが、FX1000 ではセンターにて用意されたモジュールを使用)、OpenMP は富士通ライブラリを使用)、MPI プロセス数を推奨されている 1 ノードあたり 4 プロセスとして実行したところ、FX100 に比して 2.5~3 倍程度の高速化を確認した (同ノード数、同計算規模で比較)。また、本年度のコード修正により、総グリッド数が 2^{28} を超える計算も可能となった。

up3bd コードの多次元分割化については、コードの可用性を高めるため、粒子データ移動を 1 方向ずつ複数回行う形式での実装を検討している。

【モデル化研究】

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ことを目的として、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行う。2020年度は、変数の持ち方の変更などコードのリファクタリングに伴う基礎的な変更を行うとともに、電子の導入に伴う Δt の厳しい制約を緩和するため、時間発展手法の変更について検討を行った。

【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。

2020年度は、VISMOのFX1000への移植とともに、可視化パラメータを設定するツールを開発した。

FX1000への移植は計算機センターのご協力のもとで進めることができた。計算機センターには、PNG及びZLIBライブラリを開発版とともにインストールしていただき、そのインストール環境に合わせたMakefile作成にもご助言いただいた。改めて計算機センターに感謝申し上げる。

スライスやボリュームレンダリング、流線などを使用した可視化を実行する場合に必要なカラーマップのデータを容易に作成できるツールを開発した。また、カメラの位置や等値面の色設定、スライスの設定が可能となるツールも開発した。これらの設定はCGの知識が必要であるが、このツールを使う

ことでインタラクティブに設定することができる、図1はカラーエディターのユーザインターフェース(UI)で、カラーマップのデータを定めることができる。図2はカメラエディターのUIで、カメラの位置や向きを決定し、等値面の色設定、スライスを設定することができる。いずれのツールもPythonベースで開発したので、Windows、Mac、Linuxなど様々な環境で利用することができる。

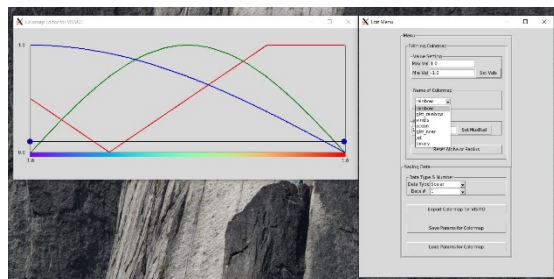


図1：カラーエディター

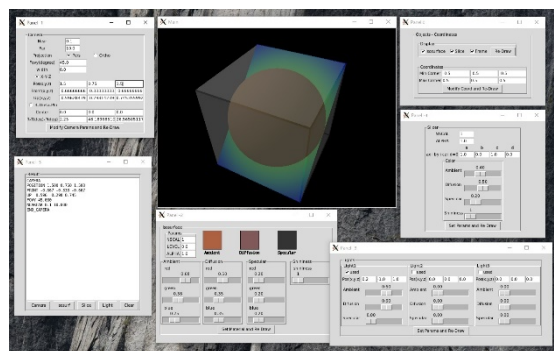


図2：カメラエディター

【物理課題の研究成果】

磁気再結合研究では、特異な速度分布形成によるイオンの実効的加熱の研究を更に推進した。多数のパラメータランの結果、形状面ではマクスウェル速度分布とほぼ見分けが付かない、擬似的マクスウェル速度分布構造が形成されていることを発見し、これは厚みを持つ円環速度分布であることを突き止めた。同時に、特異な速度分布のうち、円環状分布が形成されるか擬似的マクスウェル速度分布が形成されるかの条件の切り分けを、ある程度定量的に把握することに成功した。以上は、これまで実験、観測において「熱緩和過程が働いて（真の）マクスウェル速度

分布が形成された」と誤解されてきた可能性を指摘したものであり、様々な分野に大きな影響を及ぼす可能性がある成果である。

プラズマ輸送の物理研究では、up3bd コードを用いたシミュレーションの結果の解析を進め、フィラメント伝播における同位体効果の再検討を進めた。その結果、フィラメントの伝播速度の観測値が、シース効果と分極ドリフト効果を単純に重畳させた場合の理論的な見積りとよく一致することがわかった。一方、三重水素プラズマでは、観測値が理論値よりも若干遅くなっているが、これは、分極ドリフト効果が強く働いている、もしくは、粒子旋回運動効果によるものと考えられる。さらに、フィラメント伝播における磁力線方向の密度勾配の効果を調べたところ、フィラメントの実効的な長さが短く、かつ、磁力線方向の密度勾配が緩い場合に、フィラメントの回転にともなうと考えられる速度減少が見られた。

高速粒子による波動励起の研究では、系統的なシミュレーションを行って、低域混成共鳴周波数付近の波の飽和レベルが大きくなる条件を調べた。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、大型ヘリカル装置 (LHD) の実験と一致する結果を得た。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

【コード研究・開発】

PASMO コード及び up3bd コードの開発では、コンパイルオプションを入れ替えるのみで、スムーズに FX1000 へ移植を行うことができた。また、PASMO コードの開発では、粒子の Pusher 及び Gather プロセスを最適化することで、FX100 と比較して計算効率を 1.3 倍まで向上することができ、最適化前後では 1.7 倍まで向上することができた。up3bd コードの開発では、計算機センターが提供するモジュール (FFTW) や富士通ライブラリ (OpenMP)

を使って、FX100 に比して 2.5~3 倍程度の高速化を確認できた。

PASMO コードの今後の展望として、D0 文の入れ替えや粒子番号のソーティングなどの更なる最適化を進めたい。また、粒子軌道の可視化に対応して、データ構造の変更を考えている。

up3bd コードの今後の展望として、FX1000 における更なる最適化とともに、多次元分割化の実装、検証作業を進める。また、y 方向の領域分割に対応した初期密度分布設定ルーチンの開発、初期分布設定サブルーチンへの設定オプション（例えば、プロブが複数個存在するような密度分布設定など）の追加やコード体系におけるデータ構造の変換の検討なども行いたい。

【モデル化研究】

MUTSU/MINOS の開発では、物理モデルの変更作業に着手した。変更作業は 2021 年度完了を第一目標とするが、電子の運動を扱うために、安定性条件が厳しくなることが予想される。このため、時間発展手法など数値安定化を図るための方策を検討しつつ作業を進める。

【その場可視化の研究・開発】

VISMO の開発については、今年度の開発計画は、達成された。今後は、VISMO に統計的なデータを可視化する機能の付加を検討している。また、カーテシアン版および Yin-Yang 版の基本バージョンの公開を進める。

【物理課題研究】

磁気再結合研究では、円環状速度分布が形成される必要条件の 1 つを把握することができ、この点は概ね順調に進捗した。それに加え、熱緩和されていないにもかかわらず擬似的なマクスウェル速度分布が形成されることを見出し、その形成機構を理解できたことは、予想以上の進捗であった。一方、中間報告時に追加計画した、特異な速度分布から生じる微視的不安定性について、先行研究との

関連性を検討するに留まった。今後は、特異な速度分布の種類が、X 点からの距離および物理パラメータにどう依存するかを明らかにすること、カオス理論、軌道理論などの面から、形成条件を理論化することを目指す。

プラズマ輸送の物理研究では、様々な初期条件（フィラメント端の密度勾配、磁場と終端板の角度、など）に対するパラメータランを実施し、より普遍的な運動論的效果の理解等をめざしたい。

高速粒子による波動励起の研究では、低域混成共鳴周波数帯の波の励起条件についての理解が進んだ。また、高速粒子を注入し続ける効果についても、新たな知見が得られつつある。進捗状況は、当初予定の 60%程度である。今後は、注入効果についての成果のまとめ、線形理論や実験結果との比較を行う。

今年度の計画に対する自己評価として、コード研究・開発、モデル化研究及びその場可視化の研究・開発では申請時に掲げた計画を達成することができた。物理課題の研究でも計算機を活用して研究成果を上げることができた。査読あり学術論文に 2 本の論文を掲載することができ、また、査読あり国際会議プロシーディングスに 2 本、査読なし国際会議に 6 件、査読なし国内会議に 10 件の発表を行うことができた。すべての研究・開発において、計画を十分に達成することができた。

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）

・ MD Shahinul Islam, Seiji Ishiguro, Hiroki Hasegawa, and Theerasaran Pianpanit, 'Study of energy loss processes during H gas puffing by the PIC simulation', Nuclear Materials and Energy 27, pp. 100995-1 - 100995-8, 2021.

・ M. Toida, 'Simulation study of trapped electron effects on positron acceleration by a shock wave in an electron-ion-positron plasma', J. Phys. Soc. Jpn. 90 014501, 2021.

(2) 国際会議プロシーディングス（査読あり）

・ S. Usami, R. Horiuchi, T. Moritaka, Y. Ono, M. Inomoto, H. Tanabe, 'Particle Simulation on Merging Processes of Two Spherical Tokamak-Type Plasmoids Confined in a Conducting Vessel', 28th IAEA Fusion Energy Conference (FEC2020), TH/P5-13, 2021.

・ H. Hasegawa, H. Tanaka, and S. Ishiguro, 'Linear Analysis of Cross-field Dynamics with Feedback Instability on Detached Divertor Plasmas', 28th IAEA Fusion Energy Conference (FEC2020), TH/P4-18, 2021.

(3) 国際会議発表（査読なし）

・ S. Usami, R. Horiuchi, H. Ohtani, 'Non Maxwellian velocity distribution formed by Pick-Up-like behaviors of protons during magnetic reconnection', 4th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, October 26-31, 2020, Remote e-conference.（招待講演）.

・ Hiroki Hasegawa and Seiji Ishiguro, 'Ion Inertial Effects on Plasma Filament Propagation', 29th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (ITC29), Toki, Gifu, Japan, October 27-30, 2020（ポスター発表）.

・ MD Shahinul Islam, Seiji Ishiguro, Hiroki Hasegawa, and Theerasaran Pianpanit, 'Study of energy loss processes during H gas puffing by the

PIC simulation', 24th International Conference on Plasma Surface Interaction in Fusion Devices (PSI-24), online, January 25-29, 2021 (ポスター発表).

・Hiroki Hasegawa and Seiji Ishiguro, 'Three-dimensional Kinetic Effects on Plasma Filament Dynamics', 24th International Conference on Plasma Surface Interaction in Fusion Devices (PSI-24), online, January 25-29, 2021 (ポスター発表).

・Seiji Ishiguro and Hiroki Hasegawa, 'Particle-in-Cell Plasma Simulation of filamentary coherent structures', 31st Workshop on Sustained Simulation Performance, online, March 16-19, 2021 (招待講演).

・M. Toida, H. Igami, A. Fukuyama, K. Saito, S. Kamio, and R. Seki, 'Parametric study of ion cyclotron wave instabilities near lower hybrid resonance frequency caused by energetic ions with low pitch angles' 29th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (ITC29), October 27-30, 2020 (ポスター発表).

(4) 国内会議発表 (査読なし)

・三浦英昭, 大野暢亮, 陰山聡, 大谷寛明, '乱流シミュレーションにおける同時可視化手法を用いた構造解析', 日本物理学会秋季大会, 2020 年 9 月 8-11 日, オンライン.

・三浦英昭, 大野暢亮, 陰山聡, 大谷寛明, '3次元乱流の VISMO, 4DSV による in-situ 可視化', 第 34 回数値流体力学シンポジウム, 2020 年 12 月 21-23 日, オンライン.

・大野暢亮, 三浦英昭, "In-Situ 可視化ツール VISMO のベクトル化", 先進的描画技

術を用いた可視化情報の研究会 (VR2020), 2020 年 12 月 17 日-18 日, オンライン.

・宇佐見俊介, 堀内利得, 大谷寛明, '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', ひので・実験室研究会, 2020 年 11 月 24 日, オンライン.

・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特異な速度分布に関するシミュレーション研究の進展', 第 37 回プラズマ・核融合学会年会, 2020 年 12 月 1 日-4 日, オンライン.

・長谷川 裕記, '運動論的シミュレーションによる境界層領域プラズマ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 2020, 2020 年 9 月 17 日, オンライン.

・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イオン質量効果', 第 37 回プラズマ・核融合学会年会, 2020 年 12 月 1-4 日, オンライン.

・長谷川 裕記, 石黒 静児, 'プラズマファイラメントにおける磁力線方向ダイナミクスの効果', 日本物理学会第 76 回年次大会, 2021 年 3 月 12-15 日, オンライン.

・樋田美栄子, 伊神弘恵, 福山淳, 齋藤健二, 神尾修治, 關良輔, '低ピッチ角の高エネルギーイオンによる低域混成共鳴周波数付近のイオンサイクロトロン波不安定性', 第 37 回プラズマ・核融合学会年会, 2020 年 12 月 1 日-4 日, オンライン.

・小谷翼, 樋田美栄子, 森高外征雄, 田口聡, 'リング状速度分布を持つ高速イオンによる低域混成波不安定性に関する PIC シミュレーション: 高速イオン注入の影響', 日本物理学会第 76 年次大会, 2021 年 3 月 12 日-15 日, オンライン.

(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)