

jh160023-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ブロボ現象のように、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、核融合プラズマの閉じ込め性能改善への寄与を図ることを目的として、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. 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、情報通信研究機構（情報通信研）、北里大学、京都大学、名古屋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した。

(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

トカマク型装置で発生しているディスラプション現象などはプラズマ閉じ込めの崩壊を招き閉じ込め性能を悪化させる。これらの現象は、微視的物理が重要な役割を果たす磁気再結合が引き金となって発生していると考えられている。また、周辺領域におけるプラズマ輸送現象の理解、それに基づくプラズマの制御もまた、喫緊の課題である。その中でも、特に、周辺領域における動径方向の非拡散的輸送現象は、炉壁保護の観点からも、また、輸送係数を決める上でも極めて重要である。そのような非拡散的輸送をもたらす機構として、ブロボ現象（間欠的に発生する磁力線に沿ったフィラメント状のプラズマのコヒーレント構造）が考えられているが、そのブロボの挙動を正確に予測するためには、ダイバータ板近傍で生じるシース電位と自己無撞着なブロボ構造内部の電流系を計算する必要がある。このように核融合プラズマで発生する不安定性や粒子輸送の研究では、微視的物理を正確に取り扱いつつ装置全体にわたる巨視的現象も取り扱う必要がある。

本研究課題は、ディスラプションやブロボ現象のように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、微視的観点からその発生機構の解明を目指し、核融合プラズマの閉じ込め性能改善への寄与を図ることを目的とする。そのために、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、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、大規模粒子データの解析を行う In-Situ 可視化の研究・開発を推進する。コード開発・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：超並列に対応したアルゴリズム開発・研究を行う。H28 年度は、PASMO コードの高コストな個所のアルゴリズムの再考を進め、OhHelp ライブラリの具体的な導入を進める。p3bd コードでは、更なる高速化・大規模化を目指し、PASMO コードを参考にした領域分割化、粒子ソートの導入を進める。

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全体などのグローバルな系を扱うことは現在・近未来のスーパーコンピュータでも不可能である。そこで、粒子シミュレーションなどから得られた知見から微視的現象をモデル化し、磁気流体力学(MHD)モデルのような巨視的モデルに組み込むことで、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。H28 年度は、流体コード MUTSU/MINOS コードを元に、粒子シミュレーションがもたらす粒子分布関数のモーメントから格子解像度以下の運動の影響を評価し、これを巨視的な流体運動へと反映させるインターフェースを作成する。

③大規模粒子データの解析を行う「In-situ 可視化」の研究・開発：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データをすべて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。そ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「In-situ 可視化」の研究・開発を行う。H28 年度は、FX100 での最適化を進める。また、ライブラリの可視化手法の拡充を進め、In-situ 可視化の欠点である対話性の欠如を克服するため、対話性を持たせた In-situ 可視化手法を開発する。

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同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

H27 年度は各コードの FX100 への移植及び最適化を進めた。PASMO コードは、コンパイラによる自動並列ができなかった箇所について OpenMP でスレッド並列を行うことで、最適化前と比べ 7 倍の性能向上を実現した。MUTSU/MINOS コードは最適化以前に比べて 30%-40%の速度向上を果たした。また、PASMO へ OhHelp ライブラリを導入するため、PASMO コードと OhHelp ライブラリが推奨するデータ構造の差異を検討し、導入の際の問題点を洗い出した。In-situ 可視化ライブラリ VISMO については、PASMO に組み込んで FX100 での実行を試みた。

5. 今年度の研究成果の詳細

● 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およ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。これまでの多くの粒子シミュレーションでは周期境界条件を使っていたため、磁気再結合で加熱・加速され系外へ排出される粒子及び磁場エネルギーが再び系内に流入してしまい、再流入が始まるまでの短い時間のみのシミュレーションが可能であった。しかし、開放系境界条件を PASMO では採用しているので、系外へ排出される粒子及びエネルギーはそのまま排出されたまま

で、長時間のシミュレーションが可能である。これが PASMO の開発意義である。

PASMO コードの最適化では、OhHelp の導入と高計算負荷の箇所に関する最適化を進めた。

磁気再結合のシミュレーションをする場合、磁場が反転して電流層が発生している領域や磁気島が存在する領域はそれ以外の領域に比べより多くの粒子が存在して、粒子分布は空間的に非一様となる。PASMO で採用している 3 次元領域分割は計算領域を均等に分割しているため、電流層や磁気島の存在する領域を担当するプロセスとそれ以外のプロセスで計算負荷に不均一が生じ、計算効率が低下する。これを解決するため、OhHelp ライブラリ (粒子モデルプラズマシミュレーション向けの動的負荷分散アルゴリズムを適用したライブラリ) の導入を昨年度より検討してきた。ライブラリが推奨する粒子のデータ構造と PASM0 のデータ構造に著しい差異があるため、その導入は困難を極めるかと予想されたが、マクロを使うことでその困難性の一部が解消された。

PASMO は、Particle-in-Cell 法によって、多数のプラズマ粒子と格子点上電磁場間の相互作用を計算しているが、粒子位置を介した格子点配列への間接参照が SIMD 最適化やソフトウェアパイプラインを阻害している。そこで、ループ分割による処理の分割 (粒子の位置と速度の更新部と電流密度の計算部) を試みたが、ループ間での配列データの受け渡しがネックとなり、かえって性能は悪化した。しかし、IF ブロックの除去、小規模配列のスカラ化、最適化制御行の追加、最適化オプションの使用により、SIMD 化や一部のループでソフトウェアパイプラインが行われ、当該箇所の性能を約 1.43 倍向上させることに成功した。

一般に磁気再結合は、再結合される磁場と垂直な方向に縦磁場が存在している。このような磁気再結合は、球状トカマクにおけるプラズマ合体などの多くの実験で調べられており、電子は磁気再結合点近傍で、イオンは下流で加熱さ

れていることが報告されている。しかし、どのような機構で加熱されるのか、未解明である。

そこで今年度は、2 次元の PASM0 コードを用いて、縦磁場がある場合の磁気再結合におけるイオンの加熱機構について調べた。PASMO によるシミュレーションの結果、多くの実験で見られるように、磁気再結合下流でイオンの温度上昇が見られた。下流におけるイオン速度分布の変化を調べたところ、リング状の特徴的な構造を見出し、イオンは実効的な加熱を受けていることを見出した。この速度分布構造から、一部のイオン (水素イオン) が非断熱的な運動をすることにより、縦磁場の周りをジャイロ運動しながら ExB ドリフトによってアウトフロー方向に動く、という実効的な加熱過程が明らかになった。さらに、このようなイオンがどこでどのようにして運動エネルギーを得ているのかについて解明した。また、この実効的な加熱の縦磁場依存性について調べて、実験結果の傾向とよく合うことが確かめた。

一方、見出された実効的な加熱過程は、よく知られている pickup と解釈することも可能である。しかし、これまで pickup 機構は水素イオンには働かず、重イオンに対してのみ働くと考えられてきた。本研究では、駆動型磁気再結合のような条件下においては、水素イオンの pickup は従来の pickup 理論と矛盾しないことを示した。

このように PASM0 コードの計算性能向上、磁気再結合の物理課題解明という点で目標を達成することができた。

● p3bd コード

p3bd 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 (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、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、静電ポテンシャルの計算に使用するポアソンソルバー（FFT）やプラズマ粒子の速度分布を計算するサブルーチン群のチューニング（ループ交換、自動並列から OpenMP への変更、numa に関する実行コマンドオプションの追加、配列削減等）により、メモリ節約と約 1.5 倍の高速化がなされたコードを使って、プラズマブロボ（磁力線に沿ったフィラメント状のプラズマコヒーレント構造）とホール（ブロボと同じく、磁力線に沿ったフィラメント状のプラズマコヒーレント構造であるが、背景プラズマよりも密度が低い）が不純物イオンを輸送する過程を、長時間（現象の物理的な時間において）、シミュレーションすることが可能となった。

最適化されたコードを用いていることで長時間シミュレーションが可能になり、ブロボやホール現象における物理課題を解明したという点で目標を達することができた。

● MHD コード

核融合実験装置 Large Helical Device (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、MHD In Non-Orthogonal System (MINOS) の改良を行った。MINOS コードは、MUTSU/MINOS コードの原型になったコードであり、MUTSU/MINOS コードの機能拡張に先立ち、MINOS コードでの先行改良を施すことにした。この改良は、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ることと、さらに、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) コード化することである。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改良の意義である。

ジャイロ粘性効果は、プラズマのイオンが磁力線の周囲を回転することで発生する、非等方圧力のような効果であり、圧力と速度勾配テンソルの積の組み合わせで表現される。このジャイロ粘性項を加えた拡張 MHD 方程式に、運動方程式右辺や電場に関する SGS 効果の項（流体力学では SGS モデルと呼ばれる）を加えた。この SGS 項は速度勾配テンソルや電流のグリッドスケール成分で表され、粘性・抵抗値同様の働きを、座標によって違う値で示す。今年度は SGS モデルの係数 (Smagorinsky 係数) を大きくし、実験データと合致する係数についてのパラメータサーベイを行った。

この MINOS コードは昨年度に最適化を進めたコード MUTSU/MINOS の原型になったコードであり、現在はパラメータサーベイ用のコードとして利用している。今年度は、FX100 に合わせた高速化を行った。このシミュレーションコードは、7 年前に、当時のスーパーコンピュータ (日立 SR16000) について最適化が行われ、ピーク性能に対して 3-4% の性能が出るコードとなっていた。このコードは MPI、自動並列化によるスレッド並列のハイブリッド並列での実行を前提にしたものであるが、今回はパラメータサーベイ用に、各計算ノードに独立したシミュレーションを行ったため、MPI による並列化率はほぼ 100% であった。他方、FX100 の自動並列化機能によってノード内のスレッド並列化を試みたところ、部分的に著しく並列化効率の低い部分が発生した。これは、ループ長が 100~600 程度のループについて、自動並列オプションで生成されるスレッド並列がループ長 300 程度で有効になるものであったことが原因で、ループ長 100 の箇所では完全にシーケンシャルな実行を行うことになっ

た。この結果、実効性能はピーク性能に対して 0.1%まで低下した。このコードの 20 か所程度に OpenMP の指示行を明示的に挿入してハイブリッド並列化を行ったところ、実効性能はピーク性能に対して 4%程度と、SR16000 と同程度の性能に回復した。

このように、LHD プラズマのパラメータサーベイを行って高温プラズマの不安定性の物理解明に寄与できたという点と、パラメータサーベイ用コードを FX100 向けの最適化が行えたという点で目標を達成できた。

● In-situ 可視化の開発

我々は In-Situ 可視化ツール VISMO を開発している。VISMO は、分散並列化されているシミュレーションコード向けに開発されており、MPI により分散並列化されている。また、MPI のプロセス内では、OpenMP により共有メモリ型の並列化も施されている。

In-Situ 可視化では、シミュレーションコードは生データではなく可視化した画像を出力する。このため視点やと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 In-Situ 可視化した結果を画像ではなく点群として保存する機能を 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ようにしたことがこのライブラリの開発意義である。実装方法は、次のとおりである。ユーザーが設定した画像解像度で点群の詳細度が決まる。

- ・等値面：独自に拡張した 2 段階のレイキャスティング法で点群を取得する。手前の面に隠れた面からも取得する。
- ・スライス：ユーザーが設定した解像度に応じて点を面上に発生させる。
- ・矢印：矢印の位置と方向を取得する。
- ・流線：Runge-Kutta 積分で得られた点をユーザーが設定した詳細度に応じて間引く。

等値面およびスライスの点群のデータ量削減の検討を行った。それらの点群の 3 次元的位置は、3 つの単精度実数で表現しているが、いずれも基本的にレイキャスティングベースで得られているデータであり、ピクセル位置と深度データで表すことができる。ポスト処理で点群のデータ量を削減するプログラムを開発した。今後、VISMO 本体にも実装する。この開発で、等値面、スライスとも 20%のデータ量削減に成功した。PC 用ビューアは、KVS(Kyoto Visualization System)を用いて開発した。また、本年度は、没入型 VR 装置 CAVE への表示を試みた。この開発により、In-Situ 可視化された結果を対話的に視点を変えながら観察することが可能となった。

このように In-situ 可視化の最大の難点である非対話性を克服できたことで目標を達成することができた。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

● PASM0 の最適化について

PASM0 は 3 次元領域分割法を使って分散並列化されている。領域分割に対応した開放系境界条件の開発を進めてきたが、境界層における電流密度の計算方法で粒子数が 1 セルを十分に満たしていないことがわかり、境界層における電流密度の計算アルゴリズムの改良を今年度後半で進めた。また、5. で述べたように OhHelp を PASM0 に導入するにあたっての困難の一部が解消され、現在、導入を進めている。来年度中には導入を終えることができると考えている。また、IF ブロックの除去、小規模配列のスカラ化などにより、最も計算負荷が大きかった粒子の更新・電流密度の計算ループで約 1.43 倍向上させることに成功した。以上のように、PASM0 の最適化に関する今年度の研究計画は順調に進めることができ、来年度中には最適化・OhHelp の導入を終え、プロダクトランを行う予定である。

● p3bd の最適化について

今年度は、当初の予定どおり、高速化チューニングされたコードによって、不純物イオンを含むプラズマ中のプロブ／ホール伝播に関する

るシミュレーションを実行し、そのダイナミクスに関する知見を得ることができた。また、ソートの導入、領域分散並列化への移行の各作業を開始すると同時に、領域分散並列に対応したポアソンソルバーの開発を進めた。当該のポアソンソルバーの開発はほぼ完了し、その導入作業を進めている。

● MHD コードについて

今年度前半はパラメータサーベイ用コード MINOS を用いて、各ノードに独立したシミュレーションを行った。後半は、MINOS に施した改良と同内容の改良を MUTSU/MINOS コードに施し、1 つのパラメータについて複数の計算ノードを用いた大規模シミュレーションを目指して、MPI によるプロセス並列についての最適化を進めた。今後、更なる最適化を進める。

● 微視的モデルの開発について

粒子シミュレーションによる粒子分布関数のモーメントから格子解像度以下の運動の影響を評価し、これを巨視的な流体運動へと反映させるインターフェースの検討を行った。現在、このインターフェースを効率よく実装する準備作業として、変数の持ち方の変更作業を行っており、これが終わったのちに、今後、実装の作業を進める。

● In-situ 可視化について

In-situ 可視化で生成される可視化データは、データの保存・転送・ポスト処理を円滑に行うため、できる限り小さくする必要がある。今年度はポスト処理ではあるが、データ量を削減することに成功した。今後、このデータ削減機能を VISMO ライブラリ本体への組み込みを予定している。また、FX100 での最適化は来年度に行う予定である。粒子コードに限らず、流体コードなど他のコードへの適用を進め、VISMO による In-situ 可視化の有効性を調べる。

● 資源の利用状況

粒子コード p3bd コード及び MHD コード MINOS を各々 FX100 でプロダクトランを行った。その結果、核融合分野で最も権威のある国際原子力機

関核融合エネルギー会議 (IAEA-FEC) で 2 件のポスター発表をすることができた。他にも国際会議で招待講演を得ることもできた。また、PASMO 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た。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

同じ核融合科学研究所に所属するメンバーでは、定期的に会合を設け、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た。また、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、また、核融合科学研究所まで出張していただいて議論を深めることができた。共同研究を順調に進めることができた。

● 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み、また、SGS モデルを導入するなど、粒子コードの結果を流体コードに反映させるための手法研究も進めることができた。また、VISMO はシミュレーションコードに組み込むことを前提に開発を進めており、PASMO などの粒子コードや MHD などの流体コードとの具体的な結合を来年度以降に行う。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る。

● 今年度の研究計画に対する自己評価

FX100 への最適化、実行効率向上のためのアルゴリズムの再考、物理課題の成果、粒子コードと流体コードの結合、シミュレーションコードと可視化ライブラリの結合など、どの課題も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

- [H. Ohtani](#), [M. Shoji](#), [N. Ohno](#), [Y. Suzuki](#), [S. Ishiguro](#), [A. Kageyama](#) and [Y. Tamura](#): “Visualization of Dust Particle Data with Plasma Simulation Results Using Virtual-Reality System”, Contrib. Plasma

- Phys. Vol. 56, No. 6-8, (2016) 692-697, DOI:10.1002/ctpp.201610054.
- A. Ito and H. Miura: “Parameter dependence of two-fluid and finite Larmor radius effects on the Rayleigh-Taylor instability in finite beta plasmas”, Physics of Plasmas Vol. 23, 122123 (2016).
 - H. Miura, K. Araki and F. Hamba, “Hall effects and sub-grid-scale modeling in magnetohydrodynamic turbulenceNonneutralized charge effects on tokamak edge magnetohydrodynamic stability simulations”, J. Comput. Phys. Vol. 316, 385-395 (2016).
 - L. Zheng, W. Horton, H. Miura et al.,” Nonneutralized charge effects on tokamak edge magnetohydrodynamic stability “, Phys. Lett. A, Vol. 380, 2654-2657 (2016).
 - W. Horton, H. Miura et al., “Dust devil dynamics”, J. Geophys. Res Atmos., 121, doi:10.1002/2016JD024832. (2016).
 - T. Pianpanit, S. Ishiguro, and H. Hasegawa, “Observation of the Strong Temperature Gradient in Detached Plasma by PIC Simulation with Monte Carlo Collision”, Plasma and Fusion Research 11, 2403040-1-2403040-5 (2016).
 - M. Toida, “A theoretical study for parallel electric field in nonlinear magnetosonic waves in three-component plasmas,” Phys. Plasmas, Vol. 23, (2016) 072115.
 - S. Usami, R. Horiuchi and H. Ohtani: “Effective heating of nonadiabatic protons in magnetic reconnection with a guide field”, Phys. Plasmas, 投稿中.
 - H. Hasegawa, S. Ishiguro: “Impurity Transport Caused by Blob and Hole Propagations”, Nuclear Fusion, 投稿中.
 - A. Sagara, J. Miyazawa, H. Tamura, T. Tanaka, T. Goto, N. Yanagi, R. Sakamoto, S. Masuzaki, H. Ohtani: “Two conceptual designs of helical fusion reactor FFHR-d1A based on ITER technologies and challenging ideas”, Nuclear Fusion, accepted.
- (2) 国際会議プロシーディングス
- N. Ohno, H. Ohtani: “In-Situ Visualization with Point Cloud”, IEEE PacificVis 2016, http://graphics07.csie.ntust.edu.tw/graphics/Vis_2016/assets/paper/004%20In-Situ%20Visualization%20with%20Point%20Cloud.pdf
 - H. Hasegawa, S. Ishiguro: “Impurity Transport Caused by Blob and Hole Propagations”, 26th IAEA Fusion Energy Conference (2016) TH/P6-17.
 - H. Miura, F. Hamba, and A. Ito: “Two-fluid subgrid-scale viscosity in nonlinear simulation of ballooning modes in a heliotron device”, 26th IAEA Fusion Energy Conference (2016) TH/P1-5.
 - Y. Ono, T. Yamada, S. Inoue, M. Inomoto, C. Z. Cheng, M. Gryaznevich, R. Scannell, N. Conway, B. J. Crowley, C. Michael, H. Hara, S. Usami, and R. Horiuchi: “Reconnection Heating Experiments and Simulations for Torus Plasma Merging Startup”, 26th IAEA Fusion Energy Conference (2016) EX/P3-38.
 - A. Sagara, J. Miyazawa, H. Tamura, T. Tanaka, T. Goto, N. Yanagi, R. Sakamoto, S. Masuzaki, H. Ohtani: “Two conceptual designs of helical fusion reactor FFHR-d1A based on ITER technologies and challenging ideas”, 26th IAEA Fusion Energy Conference (2016) FIP/3-4Ra.
- (3) 会議発表(口頭, ポスター等)
- N. Ohno, H. Ohtani: “In-Situ Visualization with Point Cloud”, IEEE PacificVis 2016, Apr. 19-22, 2016, Taipei, Taiwan.
 - S. Ishiguro, H. Hasegawa, and T. Pianpanit,

- “Kinetic Physics in Peripheral Plasmas - Blobs and Detachments” (Invited talk), 10th West Lake International Symposium on Magnetic Fusion and 12th Asia Pacific Plasma Theory Conference, Hangzhou, China, May 8 - 13, 2016 (招待講演) .
- R.Horiuchi, S.Usami: “Role of magnetic islands in energy conversion process of collisionless driven reconnection” , 18th International Congress on Plasma Physics (ICPP2016), Jun. 7-Jul. 1, 2016, Kaohsiung, Taiwan.
 - S.Usami, R.Horiuchi, T.Ogawa, H.Ohtani, M.Den: “Macro- and microscopic physics of collisionless driven reconnection” , 18th International Congress on Plasma Physics (ICPP2016), Jun. 7-Jul. 1, 2016, Kaohsiung, Taiwan (招待講演) .
 - M.Toida: “Ultrarelativistic particle acceleration in a collisionless shock wave in a strong magnetic field” , 18th International Congress on Plasma Physics (ICPP2016), Jun. 7-Jul. 1, 2016, Kaohsiung, Taiwan (招待講演).
 - H.Miura, F.Hamba, and A. Ito: “Two-fluid subgrid-scale viscosity in nonlinear simulation of ballooning modes in a heliotron device” , 26th IAEA Fusion Energy Conference, Oct. 17-22, 2016, Kyoto, Japan.
 - H.Hasegawa and S.Ishiguro: “Impurity Transport Caused by Blob and Hole Propagations” , 26th IAEA Fusion Energy Conference, Oct. 17-22, 2016, Kyoto, Japan.
 - A. Sagara, J. Miyazawa, H. Tamura, T. Tanaka, T. Goto, N. Yanagi, R. Sakamoto, S. Masuzaki, H.Ohtani: “Two conceptual designs of helical fusion reactor FFHR-d1A based on ITER technologies and challenging ideas” , 26th IAEA Fusion Energy Conference, Oct. 17-22, 2016, Kyoto, Japan.
 - H. Hasegawa, S. Ishiguro: “Configuration of Self-consistent Flows in a Hole Structure” , 58th Annual Meeting of the American Physical Society, Division of Plasma Physics, Oct. 31 - Nov. 4, 2016, San Jose, USA.
 - S. Ishiguro, T. Pianpanit, H. Hasegawa: “Formation of Non-Monotonic Potential Structure in the Detached Plasma” , 58th Annual Meeting of the American Physical Society, Division of Plasma Physics, Oct. 31 - Nov. 4, 2016, San Jose, USA.
 - T. Pianpanit, S. Ishiguro, H. Hasegawa, “Time evolution of the particle and heat flux of the detached plasma” , 58th Annual Meeting of the American Physical Society, Division of Plasma Physics, Oct. 31 - Nov. 4, 2016, San Jose, USA.
 - R.Horiuchi, S.Usami: “PIC simulation studies of merging processes of spheromak-like and spherical-tokamak-like plasmoids” , 58th Annual Meeting of the American Physical Society, Division of Plasma Physics, Oct. 31 - Nov. 4, 2016, San Jose, USA.
 - 長谷川裕記, 石黒静児:「プラズマコヒーレント構造における微視的ダイナミクス研究の進展」, プラズマ・核融合学会第33回年会, 2016年11月29日~12月2日, 東北大学青葉山キャンパス(仙台市). (招待講演) .
 - S.Usami, R.Horiuchi, and H.Ohtani : “Studies on proton effective heating in magnetic reconnection by means of particle simulations” , The US-Japan Workshop and School on Magnetic Reconnection (MR2017), Mar. 19-22, 2017, Matsuyama, Japan (招待講演) .
- (4) その他 (特許, プレス発表, 著書等)

- 核融合科学研究所プレスリリース:「核融合研究が更に進展～実験データと計算データを融合し、バーチャルリアリティで表示～」、平成 28 年 4 月 5 日。
- 長谷川裕記, 研究最前線「プラズマの「紐」の振る舞いを粒子シミュレーションで調べる」, 核融合科学研究所ニュース No. 230 (2016) 4-5。
- 核融合科学研究所プレスリリース:「スーパーコンピュータで 10 億個のプラズマ粒子を計算ープラズマの紐の動きを粒子レベルで解明ー」、平成 28 年 12 月 13 日。
- EurekaAlert!, “Calculating One Billion Plasma Particles in a Supercomputer: Clarifying the Movements of a Plasma Blob at the Particle Level” , December 21, 2016.
- ITER Newslines, “ Supercomputer in Japan used for plasma edge simulation” January 9, 2017.