

jh150005-NA04

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 核融合プラズマシミュレーション研究において、粒子モデルは第一原理的な計算が可能のため粒子の運動論的効果を解析するために活用されている。しかし、装置全体を扱う系への適用は、膨大な数の粒子運動の計算が必要なため困難である。本研究課題は超並列に対応したプラズマ粒子コードを開発して、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を目指す。この微視的なシミュレーションで得られた知見から微視的現象を表すモデルを開発して磁気流体力学モデルのような巨視的モデルに組み込み、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。このような大規模系のポストプロセスとしての可視化も困難なため、シミュレーションと同時に可視化も行う In-situ 可視化の研究開発も行う。

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）、神戸大学、情報通信通信研究機構（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）：その場可視化（In-situ 可視化）の研究開発

宇佐見俊介（核融合研）：粒子コードの移植・高速化

沼波政倫（核融合研）：粒子コードの移植・高速化

長谷川裕記（核融合研）：粒子コードの高速化

三浦英昭（核融合研）：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）：問題設定、結果の評価
臼井英之（神戸大）：動的負荷分散ライブラリの活用支援

三宅洋平（神戸大）：動的負荷分散ライブラリの実装支援

田 光江（情報通信研）：流体シミュレーションとの比較、微視的物理のモデル化

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

中島 浩（京大）：動的負荷分散ライブラリの開発・実装支援

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

荻野正雄（名大）：FX100 向け最適化・実行支援

2. 研究の目的と意義

核融合プラズマのシミュレーション研究では、磁気流体力学(MHD)モデルやジャイロ運動論モデル、粒子モデルなどが使われている。粒子モデルは荷電粒子の運動方程式と Maxwell 方程式を直接解くため、MHD モデルやジャイロ運動論モデルでは取り扱えない微視的物理を解くことができ、第一原理的なシミュレーションが可能である。しかし、巨視的な時空間スケールを扱うには、膨大な数の粒子運動を計算する必要がある（具体的には数十億～数百億）。

トカマク型装置で発生しているディスラプション現象や鋸歯状振動などはプラズマ閉じ込めの崩壊を招いたり閉じ込め性能を悪化させたりするため、今後の核融合プラズマ研究の課題の一つと考えられている。これらの現象は、粒子の運動論的効果が重要な役割を果

たす磁気リコネクションが引き金となって発生していると考えられ、微視的物理学を正確に取り扱いつつ装置全体にわたる巨視的な現象をシミュレーションする必要がある。

本研究課題では次のような課題を挙げて粒子モデルを基礎としたシミュレーションコード群の整備を行い、トーラス系プラズマにおける微視的物理学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。効率的なシミュレーションコードの開発からモデリング、可視化までをひとつのパッケージとした、総合的な研究基盤の構築を目指す。

①超並列に対応した粒子コードの開発：核融合プラズマでは粒子分布が非一様なので、シミュレーション領域を単純に領域分割して並列化しても計算効率は上がらない。超並列に対応したアルゴリズム開発・研究を行う。

②大規模シミュレーションデータ解析のための「In-situ 可視化(その場可視化)」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全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。

③巨視的シミュレーションに活用するための、大規模粒子シミュレーションで得られた知見に基づく微視的現象のモデル化の研究：たとえ超並列化した粒子コードによって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。粒子コードで得られた知見から微視的現象を表すようにモデル化(パラメータ化)して 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。

この課題の研究対象である磁気リコネクション現象は太陽フレアや地球磁気圏サブストームのような爆発現象、降着円盤やブラックホール形成に伴うジェットなどでも重要な役割を果たすと考えられている。本研究課題により、ディスラプションや鋸歯状振動の発生機構の解明が進めばプラズマ閉じ込め性能の改善につながり核融合プラズマ研究の飛躍的な発展が期待でき、さらには天体現象といった多岐多様にまたがる多くの分野に貢献することができる。

本課題による粒子シミュレーションの計算結果を使えば、第一原理に基づく微視的物理学現象のモデルを提供することができ、それを組み込むことでより精密な流体シミュレーションが実行できると期待される。このようにモデリングという面からも、宇宙天気予報、銀河形成、核融合プラズマなどで行われている流体シミュレーションに対する非常に大きな波及効果が期待できる。

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動的相補的な研究体制が必要である。具体的には、①では OhHelp の開発活用に向けた計算科学分野と計算機科学分野の連携、②では何をどのように可視化するかを議論するための計算科学分野と可視化情報学分野の連携、また、In-situ 可視化ライブラリの最適化のための計算機科学分野との連携、③では粒子コードによる研究者と流体コードによる研究者の連携である。

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当該公募型共同研究は不可欠である。この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もある。以上の理由から、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

新規課題なので、該当しない。

5. 今年度の研究成果の詳細

本研究課題で超並列化のための開発を行っている粒子コードは、電磁粒子コードの PASMO と静電粒子コードの p3bd である。この超並列化のための開発(3次元コードの PASMO と p3bd、MHD コード)は次節で報告する。ここでは PASMO コード(2次元コード)と p3bd コードによるプロダクトランの成果についてまとめる。続いて、波動-粒子相互作用に基づく異常抵抗モデル(粒子シミュレーションの結果に基づく微視的モデル)をグローバル MHD シミュレーションに組み込んだ場合の異常抵抗モデルの妥当性を調べた結果について報告する。また、粒子コードの計算結果をモデル化するだけでなく、粒子コードと巨視的コードを直接接続する多階層モデルの開発も進めている。その結果についても報告する。最後に In-Situ 可視化ライブラリ VISMO の研究・開発について報告する。

○PASMO コードによる成果

PASMO コード(PARticle Simulation code for Magnetic reconnection in an Open system)は、磁気リコネクション研究のための開発された、陽解法による3次元電磁粒子シミュレーションコード(H. Ohtani & R. Horiuchi : PFR2009)であり、上流境界からプラズマと磁場フラックスを流入させることで、駆動型磁気リコネクションを研究することができる。下流領域が開放境界になっているので粒子が自由に出入りができ、開放系における長時間のダイナミクスを解析することが可能である。

PASMO コードには3次元と2次元のコードがある。3次元コードは6節で述べるように FX100 への移植等を進めている。2次元コードについてはいくつかのプロダクトランが行われ、成果を挙げた。

プラズモイドと呼ばれるプラズマの塊がリ

コネクション発生領域で発生して排出されるという現象が地球磁気圏など様々な系で観測されている。2次元 PASMO コードを使って、駆動型磁気リコネクションにおけるプラズモイドの役割について調べた。

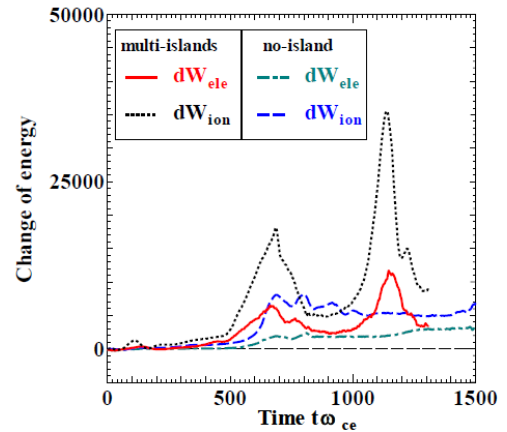


図 1 : 電磁場エネルギーからイオンと電子へのエネルギー遷移の時間変化。multi-islands と no-island はそれぞれ流入幅が広がる速さが速い場合と遅い場合に対応する。

初期条件は一樣な縦磁場を加えた温度一定の1次元平衡解で与え、上流境界から粒子をシミュレーション領域内へと流入させるために上流境界に駆動電場を加えた。プラズマは、最初に上流境界の中心から流入し始めて、その後、その流入する幅を広げ最終的には上流境界全体から一樣に流入する。この流入する幅が広がる速度を変えることでリコネクションのダイナミクスが大きく変化することが分かった。幅が広がる速度が遅い場合、プラズモイドが発生しないが、速い場合、プラズモイドがリコネクション発生領域で繰り返し発生して下流方向へ排出されることが分かった。このときの電磁場からイオンや電子へのエネルギー遷移を調べてみると(図 1)、流入する幅が広がる速さが速い場合(multi-islands)は、遅い場合(no-island)に比べ、エネルギー遷移がより強く行われていることが分かった。また、別の詳細な解析で、multi-island の場

合と no-island の場合のリコネクション率を比較すると、multi-islands の場合の方が、より大きなリコネクション率となることが分かった。以上のように、プラズモイドの発生がエネルギー遷移やリコネクション率と大きな相関があることが分かった。

○静電コード p3bd コードによる成果

p3bd コードは、プラズマブロブ(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)による非拡散的動径方向輸送を解明するために開発された 3 次元静電粒子シミュレーションコードであり (S. Ishiguro & H. Hasegawa: JPP2006)、このコードを用いて周辺領域のプラズマ輸送現象における運動論的ダイナミクスを解析している。磁力線方向の両端は固体壁(磁場閉じ込め核融合装置のダイバータ板に相当)を再現して、荷電粒子が吸収される境界条件を設定している。磁場閉じ込め核融合装置周辺領域のスクレイプ・オフ・レイヤープラズマを模擬することができる。このコードを使って、ブロブ内部に自己無撞着に形成される電流系(図 2)、電位構造が確認され、さらに、電位構造に起因する温度構造などが明らかになった(図 3) (Hasegawa and Ishiguro: PoP2015)。

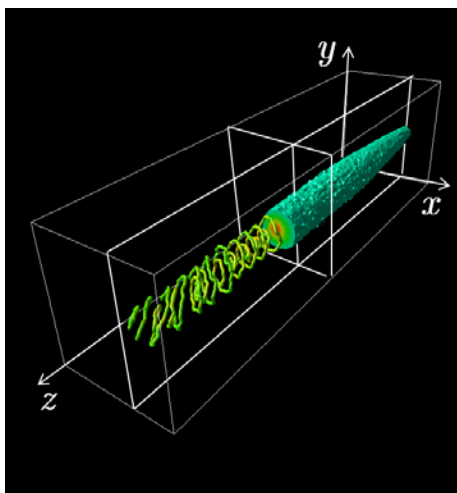


図 2 : ブロブ内部に形成された電流系 (左手前側の流線)。右奥の等値面は電子密度分布を示している。

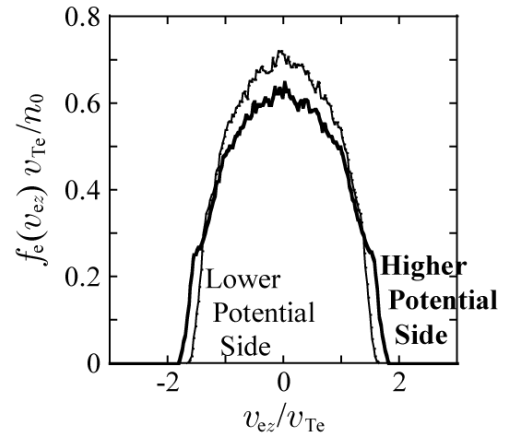


図 3 : ブロブ内部における電子の磁力線方向速度分布。電位が高い領域では電子温度が高くなっている。

○微視的現象のモデル化と巨視的モデルへの組み込み

磁気圏サブストームにある多階層性をグローバル MHD の中で無矛盾に扱う研究を行っているが、今年度は波動-粒子相互作用に基づく異常抵抗モデルの評価を行うため、サブストームのグローバル MHD シミュレーションを行った。MHD に適用する際に、磁気リコネクションの周辺磁場がダイナミカルに変化することを考慮して、異常電気抵抗モデルに含まれプラズマ密度と磁場は MHD に従って変化するとした。

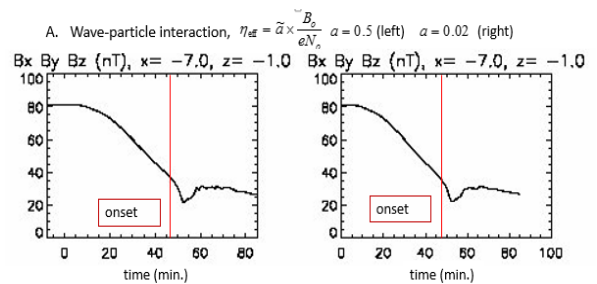


図 4 : サブストームオンセット後の磁場の双極子化の様子。横軸は時間、縦軸は磁気圏磁場の南北成分を表す。左右の図では異常抵抗モデルの大きさが異なるが、グローバル磁場の変化はおおよそ違いがない。

グローバルな磁気圏のふるまいとして、サブストームオンセット後の磁場の双極子化の

シミュレーション結果を示したのが図 4 である。図からもわかるとおり、異常抵抗モデルの大きさにほぼ依存しないことが分かった。これはグローバル MHD シミュレーションでは解像度が不十分であり、波動-粒子相互作用に関しては、サブストームにおける異常抵抗モデルの妥当性の検討が困難であることを意味している。このことから、グローバルではなく局所モデルを用いた粒子モデルと MHD の直接の比較が必須であることが示された。

○PASMO コードの応用 (PASMO と MHD コードの連結)

PASMO コードは MHD シミュレーションコードと結合させて、多階層シミュレーションモデルの開発にも活用されている。これは、磁気リコネクションの階層横断現象解明のためのモデルである。シミュレーションの実空間を分割し、マクロ領域は MHD、ミクロ領域は粒子手法 (PASMO) により計算するモデルである。このモデルを使って、マクロ階層のダイナミクスが磁気リコネクションのミクロな物理に及ぼす影響について、世界で初めての解析を行った。その結果、マクロ階層のプラズマフローのパターンによって、図 5 (a) のように単一の X 点を持ち定常なリコネクションに緩和する場合、(b) のように複数の X 点を持ち間欠的なリコネクションが継続する場合に分類できることが分かった。さらに詳しく調べたところ、このリコネクション物理の違いに関して定量的に体系づけることに成功した。

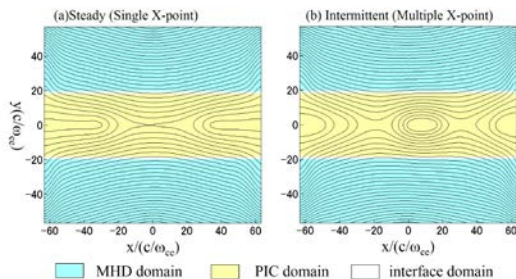


図 5 : 多階層モデルによる磁気リコネクションの解析結果。(a) は単一の X 点を持ち定常なリコネクションに緩和する場合、(b) は複数の

X 点を持ち間欠的なリコネクションが継続する場合である。

○In-situ 可視化ライブラリ VISMO の開発

In-situ 可視化ライブラリ VISMO の可視化手法はソフトウェアレンダリングであり、開発言語はシミュレーション研究者になじみの深い Fortran90 を採用している。可視化手法として、粒子・等値面・スライス・流線・矢印を実装している。In-situ 可視化の難点は、視点を変えるなど異なる可視化を行おうとすると、シミュレーションを再度実行する必要があることである。その難点を克服する一つの手段として、点群データを活用して対話性を持たせるデータ可視化手法を開発して、VISMO に組み込んだ。図 5 はテストデータについてその場可視化を行い、専用ビューワで表示した例である。

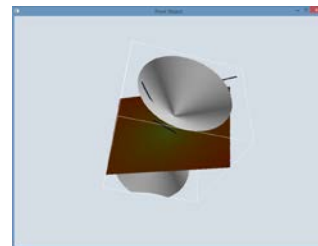


図 5 : VISMO によるテストデータの可視化。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

○PASMO コードについて

3次元 PASMO コードはこれまで日立製作所製 SR16000 で稼働していたが、今年度は富士通製 FX100 に移植するための最適化を進めた。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。しかし、最もコストの高い箇所 (粒子運動方程式を解き、電流密度を計算するルーチン) の構造が巨大すぎるため、SIMD 化やソフトウェアパイプラインによる最適化がほとんどできておらず、今後の課題である。また、OhHelp を導入するための検討を進めた。

OhHelp ライブラリ (H. Nakashima, et al: Proc. Intl. Conf. Supercomputing, pp. 90-99, June 2009) は、粒子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で、非一様な粒子密度分布の核融合プラズマ粒子シミュレーションにおいて、ロードバランスが悪くなる単純一様領域分割コードに対して、良好な負荷分散が期待される。

○p3bd コードについて

FX100 への移行作業などを中心に進めた。これまで、日立製作所製 SR16000 での計算実績があったが、同規模の計算で比較した場合、SR16000 及び富士通製 FX10 より 1.5 倍の速度向上が見られた。SIMD 化なども試みているが、それ以上の速度向上が見られないため、アルゴリズムの再検討を含めて、更なる高速化の作業を進めた。一方、本コードでは、これまで、初期の粒子分布として、プロブ構造しか与えることができなかったが、コードの改良をおこない、ホール構造（背景プラズマより密度の低い、磁力線に沿ったフィラメント状構造）も扱えるようになった。これにより、非拡散的動径方向輸送に関する研究の幅が、非常に大きく広がった。

○MHD コードについて

我々がこれまで使用してきた、核融合用非直交曲線座標系表示に基づく電磁流体力学 (MHD) シミュレーションコード、MHD In Non-Orthogonal System (MINOS) コードの FX100 への最適化および試験計算を行った。このシミュレーションコードは、スイッチによる切り替えにより、物理モデルを圧縮性 MHD 方程式、拡張 MHD 方程式、圧縮性 Navier-Stokes 方程式など複数の物理モデルの中から選択可能などの特徴をもつ。現段階では、圧縮性 MHD 方程式、圧縮性 Navier-Stokes 方程式を直角格子で解く場合について最適化および試験計算が進行し、最適化前に比べて 40%程度的高速化に成功した。今後は、非直交格子で解く場合について、最

適化を進める。

○In-situ 可視化ライブラリ VISMO について

In-situ 可視化ライブラリ VISMO では点群データによる疑似的な対話性を持たせた可視化の実装ができた。今後は、PASMO コードに実装して FX100 での実行を計画している。

○MHD と PIC の比較について

磁気リコネクションモデル構築のために、AMR-MHD コードグローバル MHD コードに電気抵抗モデルを導入する作業を進めた。また、AMR の粗い方のグリッドとグローバル MHD との接続に着手した。

○自己評価

FX100 への最適化では、粒子コード・流体コードともに高速化に成功したことから良好な成果を挙げることができた。更なる大規模計算機に向けた最適化には、OhHelp の導入も含めアルゴリズム自体の再検討も必要であることがわかり、一定の成果を挙げることができたといえる。また、In-Situ 可視化の研究では、In-Situ 可視化の最大の弱点である対話性の欠如に対して疑似的な対話性を導入することができ、非常に大きなインパクトを与える成果を得ることができた。巨視的コードのための微視的モデルの研究では、波動一粒子相互作用に基づく異常抵抗モデルの評価はグローバル MHD シミュレーションでは困難であることがわかり、今後の研究の方向性を得ることができて一定の成果を挙げることができたといえる。

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, Y. Tamura: “Visualization of dust particle data with plasma simulation results by virtual-reality system”, submitted to Contributions to Plasma Physics (2015).
- H. Miura, K. Araki, F. Hamba: “Hall effects

and sub-grid-scale modeling in magnetohydrodynamic turbulence simulations”, to appear in Journal of Computational Physics (2016).

- H. Hasegawa and S. Ishiguro, “Study of Self-Consistent Particle Flows in a Plasma Blob with Particle-in-Cell Simulations”, Phys. Plasmas, 22, pp.102113 (1-8) (2015).

(2) 国際会議プロシーディングス

(3) 国際会議発表

- H. Ohtani, M. Shoji, N. Ohno, Y. Suzuki, S. Ishiguro, A. Kageyama, Y. Tamura: “Visualization of dust particle data with plasma simulation results by virtual-reality system”, International Workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices, September 9-11, 2015, Nara, Japan.
- R. Horiuchi, H. Ohtani, S. Usami: “Macro-Micro Interlocked Simulation for Multiscale Plasma Phenomena like Magnetic Reconnection”, 12th International School/Symposium for Space Simulations (ISSS-12), July 3-10, 2015, Prague, Czech.
- R. Horiuchi: “Basis of Particle-In-Cell (PIC) simulation and its applications”, 5th East-Asia School and Workshop on Laboratory, Space, and Astrophysical plasmas, August 17-22, 2015, POSTECH, Korea.
- R. Horiuchi, S. Usami, H. Ohtani: “Role of magnetic islands in energy conversion process of collisionless driven reconnection”, 24th International Conference on Numerical Simulation of Plasmas (ICNSP2015), August 12-14, 2015, Golden, Colorado, USA.
- S. Usami, H. Miura, R. Horiuchi, H. Ohtani, M. Den: “Improvement of the Multi-Hierarchy Model for Magnetic Reconnection Studies- Interlocking between PIC and Extended MHD -”, 24th International Conference on

Numerical Simulation of Plasmas (ICNSP2015), August 12-14, 2015, Golden, Colorado, USA.

- S. Usami, R. Horiuchi, H. Ohtani, M. Den: “Development of a Multi-Hierarchy Simulation Model Based on MHD-PIC interlocking and Studies on Magnetic Reconnection”, JIFT Workshop on “Extended MHD and MHD simulations for magnetized plasmas”, August 10-11, 2015, Golden, Colorado, USA.
- H. Miura, K. Araki, A. Ito: “Short-wave Hall and gyro-viscous effects and their modelling in extended magnetohydrodynamic simulations of instability and turbulence”, 24th International Conference on Numerical Simulation of Plasmas (ICNSP2015), August 12-14, 2015, Golden, Colorado, USA.
- T. Hatori, A. M. Ito, M. Nunami, H. Usui, H. Miura: “Hierarchical simulation of Rayleigh-Taylor instability on extended MHD with AMR framework and visualization”, 24th International Conference on Numerical Simulation of Plasmas (ICNSP2015), August 12-14, 2015, Golden, Colorado, USA.
- H. Miura, T. Hatori, and K. Araki: “Scale Hierarchy in Homogeneous Hall MHD Turbulence”, The 15th European Turbulence Conference, August 25-28, 2015, Delft, Netherlands.
- H. Hasegawa and S. Ishiguro: “Study of Plasma Coherent Structure Transport Dynamics with Particle-in-Cell Simulation”, 25th International Toki Conference, November 3-6, 2015, Toki, Gifu, Japan.
- H. Hasegawa and S. Ishiguro: “Kinetic Effects on Plasma Blob Dynamics with Plasma Sheath”, 57th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, November 16-20, 2015, Savannah, Georgia, USA.
- M. Den, R. Horiuchi, S. Usami, Y. Kubota,

T. Tanaka, and H. Ohtani: "Comparative Study of Effective Resistivity Models Evaluated in Kinetic Studies Using MHD Simulation", American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting, December 14-18, 2015, Sanfransisco, USA.

- T. Ogawa, S. Usami, R. Horiuchi, M. Den, and K. Yamashita: "Multi-scale simulation of magnetic reconnection using particle-in-cell with magnetohydrodynamics on adaptively refined mesh" P2-59, The 25th International Toki Conference, Toki, Gifu.
- T. Ogawa, S. Usami, R. Horiuchi, M. Den, K. Yamashita, and T. Tanaka: "Simulation of Magnetic Reconnection in Magnetotail by Interlocking Particle-in-Cell and Magnetohydrodynamics on Hierarchical Mesh", SM51B-2565, AGU 2015 Fall Meeting, December 14-18, Sanfransisco, USA, 2015.
- S. Usami, H. Miura, R. Horiuchi, H. Ohtani, and M. Den: "Improvement of a Multi-Hierarchy Simulation Model for Magnetic Reconnection Studies", 25th International Toki Conference, Ceratopia Toki, Toki, Japan, November 3-6, 2015.
- S. Usami, R. Horiuchi, and H. Ohtani: "Simulation studies on effective ion heating in the reconnection downstream", US-Japan Workshop on Magnetic Reconnection, Andaz Napa Hyatt, Napa, CA, USA, March 7-11, 2016.
- N. Ohno and H. Ohtani, "Development of In-Situ Visualization tool VISMO", The 6th AICS International Symposium, February 22-23, 2016, (Kobe, Japan)

(4) 国内会議発表

- 大谷寛明、堀内利得、宇佐見俊介:「開放系電磁粒子シミュレーションコード PASMO の開発」、プラズマシミュレータシンポジウム 2015、土岐。
- 宇佐見俊介、三浦英昭、堀内利得、大谷寛明、田光江:「拡張 MHD と PIC 連結による多階層シ

ミュレーションモデルのさらなる発展」プラズマシミュレータシンポジウム 2015、土岐。

- 宇佐見俊介、大谷寛明、堀内利得、田光江:「実空間分割型の多階層シミュレーションによる駆動型磁気リコネクション研究 II」、日本物理学会 2015 年秋季大会、吹田。
- 長谷川裕記、石黒静児:「プラズマコヒーレント構造の輸送ダイナミクス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 2015、土岐。
- 長谷川裕記、石黒静児:「プラズマコヒーレント構造の輸送ダイナミクスの粒子シミュレーション」、プラズマ・核融合学会第 32 回年会、名古屋市千種区。
- 長谷川裕記:「連結階層モデルを用いた大規模シミュレーション」、分子科学研究所 Open seminar 「局所と大域: データサイエンスと階層性の創発」、愛知県岡崎市。
- 長谷川裕記、KINDSP プロジェクトグループ:「第一原理的手法による周辺プラズマダイナミクスの研究」、第 5 回 IFERC-CSC 研究会、東京都港区。
- 長谷川裕記、石黒静児:「ホール構造伝播の粒子シミュレーション」、日本物理学会第 71 回年次大会、仙台市泉区。
- S. Usami, R. Horiuchi, and H. Ohtani: "Studies on the Ion Heating Mechanism in the Downstream of Magnetic Reconnection", 「自然科学における階層と全体」シンポジウム, 国立天文台 (東京)。
- 宇佐見俊介、堀内利得、大谷寛明: リコネクション下流における実効的イオン加熱のシミュレーション研究、磁気リコネクション研究の最前線と今後の展望、国立天文台 (東京)。

(5) 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)、

<http://www.nifs.ac.jp/press/160405.html>