

jh170009-NAH

電磁流体力学乱流の高精度・高並列 LES シミュレーションコード開発研究

三浦英昭 (核融合科学研究所)

概要

プラズマ乱流の研究のため、巨視的なスケールについては電磁流体力学(MHD)方程式を解きつつ、ミクロスケールについては乱流の運動論的性質を定性的に組み込んだ現象論的モデル (サブグリッドスケールモデル、SGS モデル) で代替する、ラージ・エディ・シミュレーション(LES)コードの開発研究を行う。

MHD 方程式にイオンと電子の分離を表す Hall 項を加えた Hall MHD モデルによるシミュレーションコード“MUTSU/iXMHD3D-T3”を開発した。Hall 項の SGS モデルを開発し、このモデルを組み込んだ Hall MHD 乱流を実施した。また、乱れた磁力線が与える影響をモデル化してシミュレーションを実施した。拡張 MHD モデルより詳細な運動論的効果の調査のため、粒子シミュレーションコードによる磁気リコネクションシミュレーションを行い、イオンの加熱機構の一端を明らかにした。4 次元ストリートビューの開発を進め、Oakforest-PACS 上での基本動作を確認した。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

東京大学情報基盤センター

モデル開発

中島研吾 (東京大) : Oakforest-PACS 上のシ

ミュレーションコード最適化

(2) 共同研究分野

- 超大規模数値計算系応用分野
- 超大規模データ処理系応用分野
- 超大容量ネットワーク技術分野
- 超大規模情報システム関連研究分野

2. 研究の目的と意義

この研究は、無衝突に近い大レイノルズ数乱流プラズマの物理を解明するための新しいシミュレーション手法を開発することを目的とする。大レイノルズ数プラズマ乱流では、流体力学の乱流と同様に、実用上興味のある (あるいは観測可能な) マクロスケールと、乱流のエネルギーが散逸するミクロスケールとの間に 10 桁以上ものスケールの乖離が存在する。このため、マクロ・ミクロスケールの両方を同時に解く乱流シミュレーションは事実上不可能である。更に、ミクロスケールの散逸が粒子運動論的效果によって決まり、本質的に流体現象ではないことが、シミュレーションを更に難しくしている。プラズマのマクロスケールモデルとして電磁流体力学 (MHD) 方程式がよく使われるが、MHD にはこの運動論的散逸効果が含まれない。

(3) 参加研究者の役割分担

三浦英昭 (核融合研) : 研究代表者・統括・シミュレーションコード開発、Hall MHD・拡張 MHD (XMHD) の SGS モデル開発

宇佐見俊介 (核融合研) : 研究副代表者・SGS

モデル開発のための粒子 (運動論) 効果研究

大谷寛明 (核融合研) : SGS モデル開発のため

の粒子 (運動論) 効果研究

片桐孝洋 (名古屋大) : Oakforest-PACS 上の

シミュレーションコード最適化

陰山聡 (神戸大) : 研究副代表者、4 次元スト

リートビュー開発

半場藤弘 (東京大) : Hall MHD、XMHD の SGS

そこで本研究では、マクロスケールについては MHD 方程式を解きつつ、ミクロスケールについて

は乱流の運動論的性質を定性的に組み込んだ現象論的モデル（サブグリッドスケールモデル、SGS モデル）で代替する、ラージ・エディ・シミュレーション(LES)手法を採用する。

近年、MHD 方程式にイオンと電子の分離効果(Hall 項)を組み込んだ Hall MHD モデルによる乱流研究が注目を集めている。Hall MHD モデルを用いることで方程式の妥当性についての問題は緩和される。しかし、Hall 項の導入は、分散性波動の発生などにより、時間・空間の両方に非常に高い解像度を要求する。このため、Hall MHD 乱流の大規模直接数値シミュレーション(DNS)は極めて困難であることが知られている。他方、Hall MHD 乱流では、ミクロスケール近傍で大きなスケールからミクロスケールへのエネルギーの流れが強められ、従来型の SGS モデルが有効となり得ることが、近年の我々の研究(Miura et al., 2014, 2016)で示された。さらに、核融合研究においては、イオン・電子の分離効果やイオンラーマー半径効果なども取り入れた拡張 MHD (eXtended MHD, XMHD) 方程式に基づく不安定性シミュレーションが行われており、我々は最近、上述の SGS モデルを用いた XMHD モデルの LES がこの不安定性研究に有用であることを示した(Miura, Hamba and Ito, 2017)。

本研究課題では、この研究成果を踏まえ、Hall 効果など、従来の MHD モデルで取り扱われていない効果の SGS モデルを組み込んだ大規模 MHD 乱流の LES を実現する。具体的には次の三点の実現を目標とする。

【A】 Hall MHD や、より多様な効果を取り入れた XMHD モデルによる乱流のシミュレーションを実施して、SGS モデルの作成に必要な性質を抽出し、その性質を反映する SGS モデルを作成する。これにより、Hall MHD・XMHD 乱流の大規模 LES を実現する。また、プラズマ運動を忠実に再現する粒子(Particle-In-Cell, PIC)シミュレーション手法によるシミュレーションと XMHD の相互比較を通じて、XMHD モ

デルに欠けている(しかし重要な)効果を PIC シミュレーションから特定し、SGS モデルを PIC シミュレーションに合わせて最適化する LES 手法の開発を追求する。

【B】 【A】のモデルを実装した Hall MHD・XMHD 乱流の大規模 LES コードを開発する。応用上の観点から、非圧縮性 Hall MHD モデルについての擬スペクトルコードと、圧縮性 XMHD モデルについての中心差分/コンパクト差分コードの両者の開発を行う。

【C】 大規模並列シミュレーションデータを解析する可視化手法「4 次元ストリートビュー」を開発する。これにより、効率よくシミュレーション結果の解析を進める。

3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

本研究課題では、Hall MHD・XMHD 乱流の大規模シミュレーションを行うため、高速・高並列性能が発揮できる上に、1 ノードあたりの主記憶容量が大きく、高速メモリーも搭載されていることが重要な要件である。課題代表者はこれまで富士通株式会社製 FX100 システムでコード開発を行ってきたが、ノード当たりの主記憶容量の観点からは、東京大学情報基盤センターの Oakforest-PACS スーパーコンピュータの方が有利である。さらに、拠点研究機関には、先端的な CPU である Knights Landing (KNL) の最適化について先導的な研究者が在籍し、また、本課題の共同研究者には、先端計算機環境でのコード最適化の研究者や可視化をテーマとする計算科学研究者が含まれ、大規模な乱流シミュレーションの研究の観点からも、学際的な研究推進の観点からも、この拠点公募型共同研究として実施した意義は大きい。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

平成 29 年度新規採択のため、該当せず。

動エネルギースペクトル、 E_M は磁気エネルギースペクトル。

5. 今年度の研究成果の詳細

平成 29 年度の成果として、1) 非圧縮性 Hall MHD/XMHD 用 擬 スペクトルコード MUTSU/iXMHD3D-T3 の開発を行い、このコードを用いた乱流研究の LES についての研究成果を得られたこと、2) 圧縮性拡張 MHD (XMHD) 差分/コンパクト差分コード MUTSU/cXMHD3D を用いたシミュレーションに、乱れた磁力線の効果を簡単にモデル化した磁気拡散モデルを組み込み、磁気拡散係数の勾配が大きい場合には、不安定性の遷移現象が生じ得ることを明らかにしたこと、3) PIC シミュレーションによる運動論的效果の解析を磁気リコネクション現象について実施し、イオン加熱機構の一端を明らかにしたことの 3 点を報告する。

1) これまでの課題代表者らの研究 (Miura, Araki, and Hamba 2016) を基に、Hall 項特有の非散逸的な効果を表す SGS 項を開発した。この新しい SGS モデルを用いて減衰性一様等方性 Hall MHD 乱流の LES を実施し、DNS による参照データと比較したところ、平均量の時間発展やエネルギースペクトルの形状 (図 1) を良く再現することが明らかになった。LES によって得られる乱流場の空間構造も、DNS の特徴を良く再現することを確認した。この SGS モデルの開発成功により、Hall MHD の LES の計算量はクーラン条件の変更も考慮すると $1/2048 \sim 1/16392$ 程度に抑えることが可能になった。これらの成果は、国際会議および国内会議で発表済である (8. 項参照)。

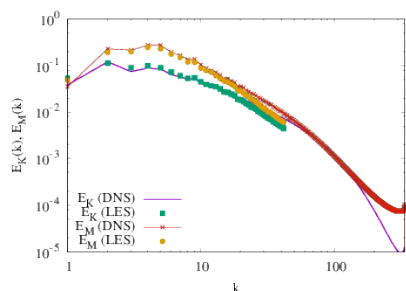


図 1: LES と DNS のエネルギースペクトルの比較。 E_k は運

2) 磁場閉じ込め核融合の周辺プラズマ近傍では、強い圧力勾配による不安定性 (交換型不安定性) が発生し、これと 2 流体効果の相互作用から乱流が発生することなどが報告されている (たとえば Sato and Ishizawa, 2017)。他方、この領域では、磁力線の乱れによる実効的な磁気拡散が大きい場合に、交換型不安定性が別種の不安定性 (テアリング不安定性) に遷移する可能性が指摘されてきた (Zheng and Furukawa, 2010)。この磁力線の乱れの効果をモデル化し、MUTSU/cXMHD3D コードに実装してシミュレーションを行ったところ、交換型不安定性からテアリング不安定性への遷移が確認された。この効果は国際会議で発表後、査読付き論文誌に投稿、掲載された。現在は、左記の効果に加えて拡張 MHD 効果 (2 流体効果、ジャイロ粘性効果) が加わった場合の乱流研究が進展中である。

3) 局所平衡仮説などに依拠する XMHD モデルでは、衝突頻度の少ないプラズマを適切に表現できないことはよく知られている。このような、非流体的な運動論的效果を解析し、SGS モデルの一部として組み込むことを目標の一つとして設定している。その一端として、PIC ~~シミュレーションコード~~による磁気リコネクションシミュレーションを実施した。イオンの実空間軌道や速度相空間での分布などの解析から、イオンが駆動型リコネクション現象の過程に於いて実効的な加熱を受ける機構の一端を明らかにした。これらの成果の一部は国際会議において発表済であり、その後の成果などは 2018 年秋に開催される国際会議に投稿中 (国内審査で採択され、現在国際委員会で審査中) である。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

2. 項の【A】、【B】、【C】各項の進捗状況と展望、共同研究の状況、資源利用状況、自己評価について報告する。

【A】項進捗状況と展望：Ha11 MHD 乱流の MUTSU/iXMHD-T3 コード（下記【B】項参照）によるシミュレーションについては、Ha11 項の SGS モデルについての小規模 LES による検証で良好な結果を得るなど、順調な進捗状況である。これまでの研究成果との照合によるコードの妥当性の検証を完了した。また、Ha11 項の SGS モデルを組み込んだ小規模 LES を実施し、良好な結果を得ている。（物理的な成果については 5. 項に記載したので、そちらを参照されたい。参照。）また現在、新規開発の擬スペクトルコード MUTSU/iXMHD-T3 コード（下記【B】項参照）による、プロダクトランに移行した。今後は、非圧縮性一様等方性 Ha11 MHD 乱流の大規模 LES から手段として、DNS ではでは計算不可能な高いレイノルズ数における、乱流の統計的な性質などに対する Ha11 項の影響の研究を進める。また、一様一定磁場を印加した場合によって生じる、乱流場の強い非等方性や乱流エネルギーの逆カスケード性を反映した SGS モデルの開発を並行して進める予定である。磁場による非等方性を取り入れたモデルの原型は既に出来上がっており考察済みであり、コードへの実装と物理的な妥当性の確認を進める。また、エネルギーの逆カスケード性を取り入れたモデルについても、物理的な考察に基づく定性的な議論からシミュレーションによる原理検証へと研究を進める。この原理検証のため、より簡単な流体モデルである、中性流体による乱流シミュレーションの実施も検討する。

圧縮性を伴う拡張 MHD 乱流については、MUTSU/cXMHD コードの整備を進め、モデルの開発とシミュレーションの実施、国際会議での発表、論文の投稿から掲載へと、極めて円滑な進捗が得られた。物理的な成果については、5. 項を参照されたい。平成 30 年度の展望として、平成 29 年度で取り入れた乱れた磁力線による輸送効果に、拡張 MHD 効果（2 流体効果、ジャイロ粘性効果）が加わった場合の乱流研究を進める。

さらに、PIC シミュレーションではコードを用

いて、磁気リコネクションや Rayleigh-Taylor 型に属する不安定性（交換型やバルーニング不安定性を含む）のシミュレーション研究を実施した。この研究は、MUTSU/iXMHD-T3 コードによるシミュレーションと歩調を合わせ行うため、平成 29 年度は、比較的小規模の磁気リコネクションシミュレーションの研究にとどまったが、順調に計算を進め、国際会議での発表などを行う一方で、MUTSU/iXMHD-T3 用に開発したポアソンソルバーを PIC コードに組み込むなど、シミュレーションの大規模化に向けた改修を行った。平成 30 年度は、MUTSU/iXMHD-T3 との比較による SGS モデルのパラメータ決定など LES 実施のための支援研究を進める。

【B】項進捗状況と展望：Ha11 MHD 乱流の LES コード開発を、非圧縮性 Ha11 MHD モデル、圧縮性拡張 MHD モデル両方面から進めている。前者は、非圧縮性条件（ポアソンソルバーによる求解を必要とする）を簡単に実装できる擬スペクトル法を、後者は、非周期境界条件以外にも利用することを想定して、高次精度の差分法の一つであるコンパクト差分法を採用する。

擬スペクトルコード MUTSU/iXMHD3D-T3 は、以前より課題代表者がベクトル型スーパーコンピュータ用コードとして使用していたものを発展させる形で開発した。この開発には高性能の 3 次元 FFT ライブラリが必要であるため、公開された 3 次元 FFT ライブラリ p3dfft (<http://www.p3dfft.net>) を採用した。このコードと p3dfft ライブラリの両者を Oakforest-PACS にインストールした。このコードの性能は、平成 29 年度末の段階で、概略以下の通りである。

- ・ストロングスケールリング

格子点数 $N^3=512^3$ の LES によるストロングスケールリング性能のテスト結果は下記の通りである。これらのシミュレーションは、Oakforest-PACS の“ジョブクラス” Regular-cache” で実行したものであり、Intel Knightslanding (KNL) CPU の高速メ

メモリー16GBをキャッシュとして利用している。簡単のため、ここでは1ノード1プロセスの場合のみ掲載した。表1に見る通り、ノード数を倍にすると計算時間はほぼ1/2になり、スケール性は良好である。

ノード数	プロセス数	時間/ステップ (秒)
8	8	507.0
16	16	253.4
32	32	128.4
64	64	62.2
128	128	32.5
256	256	16.5
512	512	9.2

ノード数	プロセス数	時間/ステップ (秒)
8	8	507.0
16	16	253.4
32	32	128.4
64	64	62.2
128	128	32.5
256	256	16.5
512	512	9.2

表1: 格子点数 $N^3=512^3$ のLESによるストロングスケール性能のテスト。

表1: 格子点数 $N^3=512^3$ のLESによるストロングスケール性能のテスト。

・ウィークスケール

格子点数 $N^3=128^3$ 、 256^3 、 512^3 のLESの1ステップあたりの時間を比較すると、以下の通りである。

格子点数	ノード数	1ステップあたり時間 (秒)	$N \log N$ による補正後の、 $N^3=256$ に対する計算時間比

$N^3=256^3$	64	1.1359	1.0
$N^3=512^3$	256	2.7412	2.145
$N^3=1024^3$	1024	5.8930	4.099

表2: 異なる格子点数のLESによるウィークスケール性能のテスト。プロセス数、プロセス当たりのスレッド数は記載を省略したが、各格子点数の場合について、最速の場合の時間を掲載した。

表2には、格子点数 $N^3=256^3$ 、 512^3 、 1024^3 の3つの計算サイズでのLESによるウィークスケール性能のテスト結果を示す。この擬スペクトルコードの計算時間の約9割以上を占めるFFTでは、一方のFFT演算ごとに計算量が $N \log N$ で増大するため、計算時間を、 $N^3=256^3$ の計算量を基準に補正した(表2右側の列)。 $N^3=256^3$ と $N^3=512^3$ では、計算量が8倍(補正後)に対してノード数4倍であるため、計算時間は理想的には2倍が期待される。これに対して、補正された計算時間は2.145倍である。 $N^3=1024^3$ の場合についても同様に、 $N^3=256^3$ の4倍の計算時間が予想されるのに対し、実測で4.099倍であり、良好なウィークスケールの性質を示している。但し、表1と表2の比較($N^3=512^3$)から、1ノード1プロセスよりも、1ノード多プロセス(表2では省略したが、 $N^3=512^3$ については32プロセス)の方が速い傾向にある。これは、主にp3dfftライブラリのスレッド並列性能に改善の余地があることを示唆する(p3dfftは最新バージョン2.7.5より、OpenMPによるスレッド並列化が行われ、上記のスケールは2.7.5を用いて行っている)が、中間報告時の性能($N^3=512^3$ では、補正後の計算時間が1ステップあたり7秒)に比べて大幅に高速化するなど、最適化に顕著な進展が得られた。

書式変更: インデント: 最初の行: 1字

書式変更: インデント: 最初の行: 1字

表 2: 異なる格子点数の LES によるウィークスケーリング性能のテスト。プロセス数、プロセス当たりのスレッド数は記載を省略したが、各格子点数の場合について、最速の場合の時間を掲載した。格子点数が $N^3=256^3$ 、 512^3 、 1024^3 と 8 倍になっていくのに対して、ノード数は 4 倍になるので、計算時間 (補正後) は 2 倍になっていくのが理想的なスケーリングである。

格子点数	ノード数	1 ステップあたり時間 (秒)	$N \log N$ による補正後の、 $N^3=256$ に対する計算時間比
$N^3=256^3$	64	1.1359	1.0
$N^3=512^3$	256	2.7412	2.145
$N^3=1024^3$	1024	5.8930	4.099

上記の通り、我々の擬スペクトルコード MUTSU/iXMHD3D-T3 は、Oakforest-PACS での Hall MHD 乱流の LES を効率よく実行可能であるが、本研究課題が目指すところは、超大規模レイノルズ数での乱流、すなわち、格子点数が最大規模のシミュレーションである。Oakforest-PACS で認められる最大実行ノード数は 2048 ノードであるので、主記憶容量の観点からは $N^3=4096^3$ の LES が可能と見積もられる。しかし、1 ステップあたりの計算時間は格子点数 $N^3=2048^3$ 、2048 ノードで 16 秒、 $N^3=4096^3$ 、2048 ノードでは 128 秒にも及ぶ。他方で、物理的な成果を得るために必要なステップ数は、 N が 2 倍になるたびに 4 倍以上になるため、 $N^3=4096^3$ のシミュレーションには、膨大な計算コストが生じることになる。(LES では DNS の場合よりも制約が緩いが、格子点数を増やしたことによる、計算ステップ数の増大は避けられない。) $N^3=4096^3$ 規模の LES の実現のためには、計算効率をさらに高める必要があり、p3dfft の最適化、改良、あるいは他の fft ライブラリへの換装が今後の課題となる。平成 30 年度には、fft 開発の専門家にメンバーに入っていただき、この点を強く推進する予定である。

プラズマの圧縮性等を反映するための差分法シミュレーションコード MUTSU/cXMHD3D については、平成 29 年度は磁気拡散モデルの実装などを進めた。平成 29 年度に実施したシミュレーションは比較的小規模なものであったが、今後は大規模シミュレーションを見据えて、最適化を進める予定である。

【C】項進捗状況と展望: 大規模な MHD シミュレーション

シミュレーションで生じる深刻な問題の一つとして、データ可視化のために転送・保存すべき数値データのサイズの爆発的増大が挙げられる。この問題を解決するため、シミュレーションと可視化を分離せず、スーパーコンピュータで計算機シミュレーションを進めながら同時に可視化も処理する(現在主流のポストプロセス可視化とは別の)可視化スタイル、つまり同時可視化に移行する。

同時可視化の場合、シミュレーションから出力されるのは(3次元の数値データではなく)2次元の可視化画像の時間列、つまり動画なので、データサイズを小さく圧縮できるという利点がある一方、可視化の視点を事前に設定してしまうので対話的な可視化ができなくなってしまうという欠点がある。

そこで我々は対話的な同時可視化手法を実現する「4次元ストリートビュー」という手法を提案している。この手法を実現するために必要なプログラムが二つある。一つは、同時可視化のためのスーパーコンピュータ用ライブラリであり、もう一つは、動画データベースから画像シーケンスを抽出・表示するための PC 用のプログラムである。平成 29 年度は前者の開発に注力した。シミュレーションに割り当てたスーパーコンピュータの計算ノード数と同程度か、あるいはそれ以上の計算ノード数を可視化だけのために割り当てて同時可視化を多数実行するものである。可視化プログラムに何か問題が生じてもシミュレーションが影響を受けないようにするために、半透膜的な機能を持つ MPMD (Multiple Program Multiple Data) 方式の並列手法で実装している。これはシミュレーションと可視化を独立させつつ、情報がシミュレーションから可視化側にしか流れないよ

うにする仕組みである。シミュレーション側からは「膜」のおもて側の面だけが見えており、反対（可視化）側は見えない。シミュレーションの進行に応じてデータを膜のおもて面に投げる。可視化側は同時可視化のプロセスの進行に応じて必要なデータを、膜（の裏側の面）に要求すると、膜は適切なデータを可視化側に渡す。

具体的には、以下の 4 つの main プログラム（それぞれが MPI_INIT を call する）があり、互いに MPI で通信する：(1) 通常の（並列化された）MHD シミュレーションプログラムの main、(2) 膜のおもて面に対応する並列プログラム、(3) それと同じ数のノード数を持つ膜の裏面に対応する並列プログラム、そして(4) 同時可視化のための並列プログラム、である。なお、可視化にはオープンソースの汎用可視化クラスライブラリ KVS を利用している。

このような設計の下でこれまで開発を進め、カーテシアン格子の MHD コードにこの手法を組み込み、Oakforest-PACS での動作を確認済した。

平成 30 年度は、さらに開発を進めるため、研究協力者を追加し、コードの最適化と高度化を図る予定である。

共同研究の状況：課題代表者と同じ核融合科学研究所に所属するメンバーとは、定期的に会合を持ち、進捗状況や方針についての情報交換を行っている。また、【A】項については、課題代表者が東京大学に共同研究者（半場）を訪ね、また、メールで情報交換を行うなど、密接に交流を行っており、共著論文も投稿目前である。また、【B】項、【C】項のコードの開発については、核融合科学研究所、東京大学、名古屋大学、神戸大学の研究者間でメールによる情報交換、あるいは訪問による議論などを行っている。特に、【B】項の擬スペクトルコード開発時は、3 次元フーリエ変換ライブラリを用いたシミュレーションの最適化のため、メールによる情報交換が重要な役割を果たした。

資源の利用について：平成 29 年 1 月の時点で、当

初割り当て資源の約 99%を消費した。その後、東京大学情報基盤センターにより、追加の資源配分を受けて、シミュレーションの追加実施を行った。本研究課題では、このように資源の恩恵を被っており、改めて JHPCN および東京大学情報基盤センターに感謝申し上げる。

今年度の研究計画に対する自己評価：課題申請時に挙げた【A】、【B】、【C】項すべてにおいて順調である。

7. 研究成果リスト

(1) 学術論文

1. H. Miura, L. Zheng, and W. Horton, “Numerical simulations of interchange/tearing instabilities in 2D slab with a numerical model for edge plasma”, Physics of Plasmas, Vol.24 (2017) 092111.

(2) 国際会議プロシーディングス

2. W. Horton, L. Zheng, and H. Miura, “Simulations and Theory of nonlinear interchange/tearing instabilities in the SOL edge of toroidal plasmas”, Bulletin of 59th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (October 23-27 2017, Milwaukee, U.S.A.) G04.00012.

(3) 国際会議発表

3. H. Miura and F. Hamba, “DNS and LES of Homogeneous and Isotropic Hall MHD Turbulence”, the 16th European Turbulence Conference (August 21-24 2017, Stockholm, Sweden)

4. H. Miura, L. Zheng, and W. Horton, “Numerical simulations of interchange/tearing instabilities in 2D slab with a numerical model for edge plasma”, The Sherwood Fusion Theory Conference 2017 (May 1-3, 2017, Annapolis, U.S.A.)

5. H. Miura, and F. Hamba, “Large-eddy-simulation approach for numerical simulation of ballooning modes in LHD”, the 26th international Toki Conference and 11th Asia Plasma & Fusion Association Conference (Dec. 5-8, 2017, Toki, Japan.)
 6. W. Horton, L. Zheng, and H. Miura, “Simulations and Theory of nonlinear interchange/tearing instabilities in the SOL edge of toroidal plasmas, the 59th annual meeting of the APS Division of Plasma Physics (Oct. 23-27, 2017, Milwaukee, Wisconsin, U.S.A.).
 7. S. Usami, R. Horiuchi, H. Ohtani, Y. Ono, H. Tanabe, “Effective proton heating through collisionless driven reconnection in the presence of guide field”, the 26th international Toki Conference and 11th Asia Plasma & Fusion Association Conference (Dec. 5-8, 2017, Toki, Japan.)
 8. H. Ohtani, R. Horiuchi, and S. Usami, “Optimization of electromagnetic particle simulation code PASMO for investigation of magnetic reconnection in open system”, 26th International Toki Conference and 11th Asia Plasma & Fusion Association Conference (Dec. 5-8 2017, Toki, Japan).
 9. H. Ohtani, Y. Miyake, H. Nakashima, R. Horiuchi, and S. Usami, “Optimization of electromagnetic particle simulation code for distributed-memory parallel computer system”, 8th AICS International Symposium (Feb. 7-8 2018, Kobe, Japan).
- (4) 国内会議発表
10. 三浦英昭、”高温プラズマ実験装置”LHD”中の圧力駆動型不安定性・非線形飽和のラージ・エディ・シミュレーション”、第 45 回 LES 研究会 (2017 年 5 月 9 日, 東京大学生産技術研究所)
 11. 三浦英昭、半場藤弘, “Hall MHD 乱流の LES とその応用”, 日本流体力学会 2017 年年会 (2017 年 8 月 30 日-9 月 1 日, 東京理科大学葛飾キャンパス)
 12. 三浦英昭、半場藤弘, “Hall MHD 乱流の LES”, 数理解析研究所研究会「非一様乱流の数理解析」 (2017 年 7 月 26 日-28 日, 京都大学数理解析研究所)
 13. 大谷寛明、堀内利得、宇佐見俊介: “開放系電磁粒子コード PASMO の開発”、プラズマシミュレータシンポジウム 2017 (2017 年 9 月 7 日~8 日、核融合科学研究所)
- (5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)