

[24]全国共同利用研究成果報告

<https://doi.org/10.15017/4763148>

出版情報：全国共同利用研究成果報告. 24, 2021-03. Research Institute for Applied Mechanics,
Kyushu University

バージョン：

権利関係：



共同利用研究集会

第 18 回トロイダルプラズマ統合コード研究会

18th Burning Plasma Simulation Initiative (BPSI) Meeting

研究代表者 京都大学 村上定義
所内世話人 糟谷直宏

1. 研究集会の開催目的

応用力学研究所においては、これまで京都大学との共同研究により核燃焼プラズマ統合コード構想を発足させ、活動を行ってきた (<http://p-grp.nucleng.kyoto-u.ac.jp/bpsi/>)。このプロジェクトは、科研費「核燃焼プラズマ統合コードによる構造形成と複合ダイナミクスの解析」(2004~2006)、「統合コードによる ITER プラズマのマルチスケール物理に関する総合的研究」(2007~2010)、「トロイダルプラズマの運動論的統合シミュレーションコードの開発」(2008~2012)等によって部分的に支援されてきた。各年度の活動状況および次年度の活動計画を含めて研究会を毎年開催している。今回で第 18 回目となるが、第 11 回よりトロイダルプラズマを対象を拡大し、炉心プラズマと周辺プラズマ、MHD 現象と輸送現象、高エネルギー粒子と乱流輸送、加熱・電流駆動と長時間運転等の複合現象の統合モデリングおよびそのシミュレーションについて、包括的なアプローチとして議論している。第 2 回~第 8 回と第 11 回~第 17 回は応用力学研究所の共同研究集会として開催してきた実績がある。

2. 開催日時

開催日程：2020 年 12 月 17 日 (木) - 18 日 (金)

開催場所：オンライン

講演数：30 件、参加者数：38 名

3. 研究集会の内容

トロイダルプラズマにおける複合現象の統合モデリングおよびそのシミュレーションの進展について議論するため研究集会を 2 日間にわたって開催した。海外(韓国、タイ)からの参加者も含めて講演 30 件(研究成果報告 24 件、サブクラスター関連 6 件)の申し込みが集まった。件数は例年と同程度であり、これまでと異なる形態での開催であったことを考慮するとまずまずの件数といえる。今回はコロナ禍の影響で研究者の移動が困難な状況であったため初めてのオンライン開催とした。一方向的な研究発表となることを避けるために研究成果報告の全件をポスター発表とし、Remo を使用することでオンライン上でも相互の議論が活性化することを期待した。また 4 件のポスター発表をピックアップし、2 日目午前 Zoom を利用した口頭発表を実施した。2 日目午後核融合フォーラムサブクラスターとの合同会合で内外の研究情勢の報告と今後の研究方針の議論を行った。

どれも質の高い研究成果報告であった。今回は加熱に関する話題が豊富であった。また前回に増して統合コードスキームにビックデータ解析などの新たな手法を適応することで

研究の幅を広げる試みが進展している印象がある。学生による講演が 13 件と前年に比べて倍増しており、若手の活躍に今後の期待が持てる。以下に研究成果講演内容を抜粋して列挙する。

登田はヘリカルプラズマにおいて、これまでに提唱したジャイロ運動論解析によるイオン熱拡散係数の簡約化輸送モデルを直接結合した輸送シミュレーションを行った。輸送シミュレーションの時間ステップごとに線形成長率を計算し、簡約化輸送モデルによりイオン熱拡散係数の値を求める手法を LHD におけるイオン温度勾配不安定性が励起している典型的なプラズマ分布や磁場配位に適用した。

鈴木は近年高速イオンの空間・速度情報を計測する手法として注目されている FIDA 計測について、GNET コードおよび FIDASIM コードを用いて LHD 実験時の FIDA 計測情報から高速イオンの分布関数をトモグラフィにより再構成する手法を開発した。

沼波はジャイロ運動論に基づく大規模シミュレーションでは 5 次元位相空間の分布関数がデータとして出力されるが、高次元のデータのため直感的な解析が難しいという問題について議論した。これまでのジャイロ運動論シミュレーションで得られた位相空間上のデータに対して、分布関数構造の可視化と OpenCV を用いたグラフ類似性判定による解析手法を適用した。

成田は核融合プラズマの密度・温度分布の形成機構の理解に資する準線形乱流輸送モデル DeKANIS の開発を進め、ニューラルネットワークを用いることで、ジャイロ運動論コードが予測する拡散・ピンチ過程の輸送量への寄与を高速に再現できるようになった。統合コードにおける輸送シミュレーションが可能になり、また、乱流揺動の飽和レベル評価に汎用性の向上のため混合長理論に基づく手法を導入した。

持永は PLATO トカマクを対象として、統合コード TASK により外部コイル電流条件を含めた輸送解析を行うことでプラズマ性能の予測を行った。また、実験において外部制御可能な粒子供給量と外部コイル電流値をパラメータとして輸送解析を行い、電子・イオンそれぞれの粒子・エネルギーバランスから密度およびプラズマ形状変化に対する電子・イオン温度依存性を明らかにした。

Wisitorsak は 非対称 SOL 領域における拡張 2 点モデルの開発について報告した。SYCOMORE コードは核融合炉全体を対象とするモジュラー型コードで、ダイバータへの熱負荷評価も重要な対象である。複雑な磁場構造と特有の輸送が熱流束の非対称性を生むので、拡張 2 点モデルに基づく SOLDIV コードを用いて解析を行っている。強い温度と密度の非対称性が得られており、結果は WEST 放電の SolEdge2D-EIRENE を用いた解析でも確かめられた。

矢本は量研で開発中の統合ダイバータコード SONIC の不純物輸送モデルの非定常化を行い、ダイバータプラズマ及び不純物輸送過程の過渡解析を可能とした。JT-60SA の高 β 定常運転プラズマに適用し、Ar 不純物入射によりダイバータプラズマが接触状態から非接触状態へと遷移する過程の過渡解析を行った。

梅崎はダイバータ板にかかる熱負荷に関して、弾性散乱では大角度散乱も生じ、粒子の進行方向が大幅に変わりうるので、流体方程式に弾性散乱による径方向への粒子輸送を導入し、ダイバータ板上の密度分布等の変化を調査した。

飯尾はトカマク型磁場閉じ込め装置において、数十程度のモード数を持つプラズマ内の

微小な磁場揺動が ECH によるトロイダルトルク発生に与える影響を、数値計算により解析した。GNET コードを用いて、非ゼロの正味トロイダルトルクが発生すること、トルク発生量が磁場揺動のモード数に依存することを示した。

山本は3次元磁場配位をもつヘリカルプラズマにおいてはECHによって衝突トルクよりも大きな $j \times B$ トルクが生じ、正味のトルクが発生することが分かってきたので、LHD における ECH トルクの磁場配位依存性ならびに加熱位置依存性を評価した。

Byung Jun Kang は反転磁気シアプラズマにおける電子ドリフトと捕捉高速イオンの反転歳差運動の共鳴をもたらす新しい不安定性について、ジャイロ運動論コード GKW を用いて解析を行った。線形成長率は高速イオンの温度勾配に比例する。さらに非線形飽和も得て、非線形モード結合や粒子・エネルギー輸送を評価した。

Yong Jik Kim は size-PDF 法を突発的熱輸送現象の統計解析に適用した。非線形ジャイロ運動論コード GKNET で得られた非局所・非拡散的輸送現象について入力パワースキャンを行い、突発現象と $E \times B$ 階段状構造の関係性の可能性を指摘した。

本多は定常状態のプラズマ予測のために、定常輸送コード GOTRESS を核とする統合モデル GOTRESS+の開発を行った。ペDESTALも含めたプラズマ分布全域の予測を無矛盾に行うため、ペDESTAL高・幅を予測する EPED1 モデルを開発して組み込み、JT-60SA の運転シナリオ予測に適用した。

福山はプラズマにおける運動論的效果を取り入れた波動伝播解析について、積分形誘電率テンソルによる記述を紹介し、吸収パワーの定式化とトカマク配位における2次元解析(低域混成波、イオンサイクロトロン波)等の最近の進展を報告した。

太田は径方向拡散係数の運動量依存性が熱輸送および高速粒子の輸送に及ぼす影響を調べた。TASK/FP コードを用いて軌道平均 Fokker-Planck 方程式を三次元位相空間上で解くことで運動論的解析を行い、径方向拡散係数を調べた。また、速度空間での拡散による径方向拡散の寄与を含めて軌道平均拡散係数を新たに定式化した。

佐々木は乱流シミュレーションによって得られた数値乱流場に特異値分解(SVD)を適用し、鍵となる時空間構造の抽出を行った。得られた SVD モードの空間構造を用いて運動エネルギーの時間発展を評価し、また、各 SVD モード間のエネルギー伝達を定量化する方法を考案した。

Taik Soo Hahn はこれまで深く捕捉された粒子に対して定式化されていたバウンス運動論モデルを捕捉境界近傍の粒子に対して Lambert 関数を用いて拡張し、gKPSP TEM シミュレーションへ適用した。それら粒子の反転歳差運動が TEM の安定化に影響する低シア領域での精度向上が期待される。

糟谷はトカマクプラズマにおける不純物制御のための統合輸送シミュレーションスキームの開発に取り組んだ。統合コード TASK でこれまでに開発した輸送計算モジュールを連成させて、プラズマ主要素および不純物タングステン分布の時間変化を計算可能とした。主要素イオン分布の変化に応じて不純物分布が応答する様相を示した。

石田は密度勾配によって駆動される抵抗性ドリフト波不安定性について円筒形プラズマ中での乱流コード NLD を用いた数値計算シミュレーションを行った。直線装置 PANTA を対象として乱流の駆動源である抵抗性ドリフト波不安定性のイオン質量依存性を放電ガス種がアルゴン、ネオン、ヘリウムの場合について調べた。

石黒は JT-60U、HSX、LHD など多くのトカマクやヘリカル装置において観測されている ECH による自発的なトロイダル回転について、JT-60U 磁場配位において、トロイダル磁場リップルの振幅を 0.0~1.0% と変化させ ECH によるトロイダルトルクを評価した。振幅が大きくなると J×トルクが増加し、衝突トルクはほとんど変化しないことが分かった。

柳原は準光学光線追跡コード PARADE のための ECCD 計算モジュールの開発に取り組んでいる。PARADE は非一様非等方媒質中を伝搬する任意の波動ビームの発展を屈折、回折、偏波、散逸の全てを考慮して記述することができる。その波動ビームの位相・強度分布に基づき、EC 駆動電流分布を簡便に評価するコードを作成している。JT-60SA における EC 入射条件を再現した系で従来の EC 評価コードと比較した結果について報告した。

森下は核融合プラズマの挙動予測の高速かつ高精度化を目指して統合輸送シミュレーションコード TASK3D をベースとするデータ同化システムの開発を行っている。計算コストの高い NBI 加熱分布の計算を簡易モデル化し、モデルパラメータを状態ベクトルに含めることで、データ同化による逐次最適化を行えるようにした。モデルパラメータをデータ同化により調整することで、予測精度を保ったまま、統合輸送シミュレーションの計算コスト削減を実現した。

黒田は PLATO トカマクにおけるバルーニングおよびキンク不安定性の評価を行った。平衡解析コード TASK/EQU を用いて計算したプラズマ磁場平衡を MHD コード MIPS に導入して MHD シミュレーションを実行した。バルーニングモードとキンクモードの両者が励起される条件で計算を行い、圧力勾配によりバルーニングモードの成長率を変化させてキンクモードとの相互作用の評価を行った。

庄司は核融合反応由来の中性子から評価できるトリトン燃焼率が高エネルギープラズマ閉じ込めに関する指標の 1 つであるので、LHD においてトリトンの発生分布が、重水素イオンビームの持つ運動量によって非等方的になることのトリトン燃焼率への影響を評価した。

以上のように今回は現地に集まることができないという状況が逆に、複数の国からも含めて多様な参加者の顔ぶれを実現した。ポスター全部を見る時間がなかった、学生の貴重な口頭発表の場を提供してほしいといった希望も受けて、来年度は直接顔をあわせることができるようになることを祈りつつ、第 19 回研究会を九州大学で開催するべく応用力学研究所共同研究に応募することとした。

4. 研究集会プログラム

12月17日(木)

(13:00 – 17:00 ポスター講演 Poster presentation)

13:00 – 15:00 ポスター講演 1 Poster 1

コアタイム core time 13:00 – 14:00 Group 1A

14:00 – 15:00 Group 1B

15:00 – 17:00 ポスター講演 2 Poster 2

コアタイム core time 15:00 – 16:00 Group 2A

16:00 – 17:00 Group 2B

(開室 start 12:30、閉室 end 17:30)

12月18日(金)

9:30 – 9:35 事務連絡 Business announcement

(9:35 – 10:55 ポスター紹介 Poster talk)

(座長：糟谷)

9:35 – 9:55 講演 1-1 糟谷 (九大)

Development of integrated transport simulation scheme for impurity control in tokamak plasmas

9:55 – 10:15 講演 1-2 本多 (量研)

Coupling of EPED1 model to the integrated model GOTRESS+ and development of JT-60SA operation scenario

10:15 – 10:35 講演 1-3 森下 (京大)

Data assimilation system based on integrated transport simulation applying a reduced model of neutral beam injection heating

10:35 – 10:55 講演 1-4 登田 (核融合研)

Transport simulation directly coupled with gyrokinetic transport models for helical plasmas

10:55 – 11:15 休憩

(Session Leader：村上)

11:15 – 12:00 議論 Discussion

12:00 – 13:00 昼休み

13:00 – 14:00 小グループ議論 Free discussion

(核融合エネルギーフォーラムサブクラスターとの合同会合)

14:00 – 14:10 藤田 (名大)

サブクラスター関係連絡事項 (定常運転・制御サブクラスターの世話人交代について)

14:10 – 14:40 宮戸 (量研)

IFERC 計算機シミュレーションセンターの現状報告

14:40 – 15:10 本多 (量研)

ITER に於ける統合モデリング活動関係の報告

15:10 – 15:40 花田 (九大)

日本の球状トカマクにおける EC によるプラズマ立上げ支援の研究 (ITPA 統合運転シナリオグループ活動への貢献)

15:40 – 16:00 休憩

16:00 – 16:30 若月 (量研)

ITPA 統合運転シナリオグループ活動報告

16:30 – 17:00 林 (量研)
サブクラスター活動に関する報告と今後の予定
17:00 散会

[Poster list]

Group 1A

P1A-1 登田慎一郎 (核融合研) S. Toda

Transport simulation directly coupled with gyrokinetic transport models for helical plasmas

P1A-2 鈴木航介 (京大) K. Suzuki

Fast-ion velocity-space reconstruction using FIDA measurements in LHD plasma

P1A-3 沼波政倫 (核融合研) M. Nunami

Visualization and similarity analysis for data of gyrokinetic simulations

P1A-4 成田絵美 (量研) E. Narita

Integrated transport simulations with a neural-network transport model and development of turbulence saturation rules

P1A-5 持永祥汰 (九大) S. Mochinaga

Transport analysis in PLATO tokamak using integrated code TASK

P1A-6 Apiwat Wisitorsarak (Mongkut's Univ. Tech. Thonburi)

Development of extended two-point model for asymmetric scrape-off layer

Group 1B

P1B-1 矢本昌平 (量研) S. Yamoto

Effects of impurity transport on detached divertor plasma transitions by time-dependent analysis of integrated divertor code SONIC

P1B-2 梅崎大介 (九大) D. Umezaki

Effect of large-angle elastic scattering between ions and neutral particles on density profile on divertor plate in divertor plasma

P1B-3 飯尾太那 (京大) D. Iio

Effect of magnetic fluctuations on the toroidal torque driven by electron cyclotron heating in tokamak plasmas

P1B-4 山本泰弘 (京大) Y. Yamamoto

Magnetic configuration and heating location dependences of the toroidal torques by ECH in LHD

P1B-5 Byung Jun Kang (SNU)

Gyrokinetic studies of fast ion precession driven drift instability in reversed shear burning plasmas

P1B-6 Yong Jik Kim (SNU)

Study of non-local transport events in flux-driven ITG turbulence

Group 2A

P2A-1 本多 充 (量研) M. Honda

Coupling of EPED1 model to the integrated model GOTRESS+ and development of JT-60SA operation scenario

P2A-2 福山 淳 (京大) A. Fukuyama

Progress of kinetic full wave analysis in plasmas

P2A-3 太田佳吾 (京大) K. Ota

Influence of the momentum dependence of radial diffusion on the transport of thermal and energetic particles in tokamak plasmas

P2A-4 佐々木真 (九大) M. Sasaki

Extraction of turbulent structures and quantification of energy transfer among structures by singular value decomposition

P2A-5 Taik Soo Hahm (SNU)

Bounce-kinetic studies on barely trapped particles' effect on trapped electron modes

P2A-6 糟谷直宏 (九大) N. Kasuya

Development of integrated transport simulation scheme for impurity control in tokamak plasmas

Group 2B

P2B-1 石田雅信 (九大) M. Ishida

Ion mass number dependence of resistant drift wave turbulence

P2B-2 石黒裕暉 (京大) Y. Ishiguro

Effects of toroidal field ripple on toroidal torque by electron cyclotron heating in JT-60U plasma

P2B-3 柳原洗太 (量研) K. Yanagihara

Development of ECCD calculation module for quasioptical ray tracing code

P2B-4 森下侑哉 (京大) Y. Morishita

Data assimilation system based on integrated transport simulation applying a reduced model of neutral beam injection heating

P2B-5 黒田 侑 (九大) Y. Kuroda

Evaluation of ballooning and kink instabilities in PLATO tokamak

P2B-6 庄司悠歩 (京大) Y. Shouji

Effects of anisotropic triton birth profile on triton burn-up ratio in LHD plasma

国際プラズマ乱流データ解析ワークショップ

応用力学研究所 稲垣 滋

目的と背景

プラズマ乱流及び乱流輸送に関するデータ解析に関する国際的なワークショップを開催する。本議論を契機にプラズマ乱流実験および乱流物理の理解の深化に寄与する。本研究集会は高エネルギーイオン輻射に関して行ってきたワークショップ及び日中プラズマ乱流データ解析ワークショップという日中の研究者による研究グループが中心となり行われてきた作業会を更に発展させたものである。本作業会を契機にその後大きく進展した研究が多く、近年の乱流物理の進展に大きく寄与している。一例として流れと乱流揺動との関連の理解、イオンサイクロロン放射(ICE)と高速イオン分布との相関の観測が挙げられる。このようなこれまでの活動において、応用力学研究所を中心とした研究グループの存在感は極めて高く、中国の若手研究者らを先導する立場にあった。本作業会を主催する事で応用力学研究所のリーダーシップが強化され、アジア及び世界でプラズマ乱流研究を先導する事を目指す。

本研究集会の特徴

本研究集会は実作業を重要視する。招待者らによる話題提供、問題定義の後、各テーマの詳細講演を行う。その後データ解析作業を行い、参加者全員が一同に会し途中結果の報告及び議論を行う。最終日には作業結果をレビューし、サマリーを行う、という形式で行われた。

今年度の研究集会

上記に述べたように本研究集会は実作業を重視する。このため全員が一堂に会してデータ解析作業を行うという従来の形式のワークショップ開催は断念した。なお、今年度前半では英国、ドイツ、中国の研究所ではロックダウンがあり、ネットワーク環境が十分に整備されていない自宅からの接続となるためコミュニケーションは主にメールで行った。(実際4月に発送した郵便物を研究者が研究所で確認したのが10月という事例があった)

今年度の予算執行

旅費としての共同研究予算使途を変更し、実験データ解析環境の整備が本ワークショップの趣旨に最も合致すると考え、実験データ収集装置(PXIe-8135の保守修理)、実験室ストリーミングウェブカム(C922n)等に使用した。

今年度の個別の活動

1. Data Driven Plasma Science

佐々木助教を中心とした九大データサイエンスチームが Dendy 教授(Warwick 大)と共に "Evaluation of abrupt energy transfer among turbulent plasma structures using singular value decomposition" と題した SVD (singular value decomposition) というデータ解析手法の共著論文を執筆し、投稿後掲載された。本論文の発展的解析を学生が継続して行った。

2. Ion Cyclotron Emission (ICE)

Dendy 教授, 稲垣, 核融合研究所チームで共著論文 "Density dependence of ion cyclotron emission from deuterium plasmas in Large Helical Device" を執筆し投稿した。また、LHD 実験では He 入射実験が行われる予定であり、そのデータ解析を九大チームとしてどのように行うか議論した。加えて QUEST における ICE 計測について検討を行った。

3. Turbulence Visualization

共同研究者の前山氏(名大)が新たな乱流の可視化のアイデアを PANTA の実データに適用した。その結果を九大チーム、Dendy 教授と共に検討し、"On the triad transfer analysis of plasma turbulence: symmetrization, coarse-graining, and directional representation" と題した共著論文を執筆し、投稿した。前山氏は計算コード等を硬化する予定であるので、それに合わせて用いた PANTA データも後悔することとした。

当初予定していた、on-siteでのデータ解析作業がなかったため成果は例年と比べると少なめではあるが、着実に論文として結実している。