

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：63902

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2016～2017

課題番号：16H07419

研究課題名(和文) ジャイロ運動論を用いた粒子シミュレーションの簡約化と核融合炉周辺プラズマへの応用

研究課題名(英文) Particle-in-cell gyrokinetic simulation for fusion edge plasma dynamics

研究代表者

森高 外征雄 (Moritaka, Toseo)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号：20554372

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：周辺領域を含むヘリカル核融合炉全体に対する運動論的プラズマ解析に向けたシミュレーションコード開発を行った。本コードはX-point Gyrokinetic Codeを非軸対称系な三次元系の拡張し、炉心-周辺領域間で滑らかに接続された平衡磁場および非構造格子系を導入している。ベンチマークとして、真空容器壁での高速粒子損失や炉心領域でのGAM振動/ゾナル流減衰を計算し、従来は独立したシミュレーションモデルで計算されきたこれらの現象を同一のフレームワークで再現した。今後、周辺領域での乱流現象やHモードへの遷移現象といった炉心-周辺領域が密接に結びついた現象の解明へと応用を進めていく予定である。

研究成果の概要(英文)：A gyrokinetic particle-in-cell code has been developed for whole device modeling of helical magnetic fusion devices. This simulation code is an extended version of X-point Gyrokinetic Code compatible with non-axisymmetric magnetic field equilibria and unstructured triangular meshes. Core and edge regions of the magnetic fusion device are smoothly connected each other both in the magnetic field profile and the unstructured mesh. High-energy particle loss at the vacuum vessel and zonal flow damping along with GAM oscillation in the core region are successfully demonstrated by using the developed code. Previously these phenomena were considered by separated simulation models specific to particle tracing or plasma transport in the core region. This code can be useful to investigate turbulent transport in the edge region and core-edge coupling phenomena such as the H-mode transition.

研究分野：プラズマ物理学

キーワード：ヘリカル核融合炉 Particle-in-cell法 ジャイロ運動論シミュレーション 核融合炉周辺プラズマ

1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込め核融合炉の実現では、核融合反応を起こすのに必要なエネルギーを持つ高温プラズマを、外部磁場を使って炉壁から隔離した状態に保つことが重要になる。代表的な閉じ込め方式であるトカマク及びヘリカル型では、核融合炉の中心にトーラス状の閉じた磁力線を形成し、そこに高温プラズマを閉じ込める。核融合炉周辺部には、外部コイルからのびる開いた磁力線が存在し、下図のように炉壁に直結した状態になっている。炉心部分では、粒子間衝突やドリフト運動、あるいは微視的乱流との相互作用によって磁力線をまたいだ様々なプラズマ輸送が起こり、徐々に外部に流出した高温プラズマは周辺部分の磁力線に沿って炉壁に衝突する。高温プラズマによる核融合炉の損傷や、それによる不純物の混入は、核融合炉の設計において極めて重要な要素であり、周辺領域での輸送シミュレーションや、炉心領域と組み合わせた全系シミュレーションは、これらを予測する上で有効な手段となる。

核融合炉の構造という点では上で述べた炉心及び周辺領域の区別はなく、高温プラズマも両者をまたがって分布するが、プラズマ輸送で支配的となる物理過程が異なるため、両者はそれぞれ別の物理モデルを使ったシミュレーションで独立して扱われることが多い。炉心部分では無衝突に近い条件で乱流輸送が卓越するため、磁化プラズマのダイナミクスを運動論的にあつかうジャイロ運動論モデルがよく用いられる。一方、周辺部では、粒子間衝突や、中性ガスあるいは金属壁との相互作用が重要となってくるため、これらの素過程を取り込みつつプラズマそのものの扱いは簡約化した流体モデルで扱われることが多い。また、炉心領域は明確な磁力線構造によって特徴付けられるため、磁気座標系をもちいて計算するものが中心的であるのに対し、周辺領域では磁力線の構造が複雑になり、また計算領域の境界が炉壁の構造で決まるため、多くの場合は円柱座標など実空間上の座標系をそのまま用いている。

近年のトカマク実験炉での観測では、周辺部においてもプロブと呼ばれる微細なプラズマ揺動が観測され、またHモードと呼ばれるプラズマ状態において周辺部分のポテンシャル構造と炉心領域での乱流レベルとの相関関係が見出されるなど、周辺領域における乱流構造や、炉心領域と密接に結びついた現象が示唆されている。このような現象を取り入れつつ、核融合炉への熱負荷を評価するためには、炉心部で用いられるジャイロ運動論モデルを周辺部までシームレスに拡張した、新しい統合シミュレーションモデルが必要となる。

プリンストンプラズマ物理研究所(PPPL)を中心に開発が進められている X-point Gyrokinetic Code (XGC)は、核融合炉周辺領域に適用できる世界でほぼ唯一の

ジャイロ運動論コードである。XGCでは、粒子法(particle-in-cell)をベースに、粗視化した速度空間メッシュを用いた流体法と組み合わせることで、炉壁でのプラズマの出入りによる活発なプラズマのダイナミクスをロバストに解析することができるようになっている。また、静電・電磁揺動を非構造格子上で表現し、有限要素法を使って空間プロファイルを求めることで、磁力線の構造と核融合炉そのものの構造の両方に適合したシミュレーションを可能にしている。XGCは、トカマクを想定して開発されてきているため、軸対称性を前提とした方程式系や非構造格子を用いていた。

2. 研究の目的

大型ヘリカル装置(LHD)をはじめとしたヘリカル核融合炉は、近年では2015年にドイツで運転が開始されたWendelstein 7-Xなど、もうひとつの核融合炉方式として研究が進展している。ヘリカル型はらせん状、もしくはそれに類する形状のコイルを使って、トーラス状のねじれた磁力線構造を作る。磁場形成の一部をプラズマ電流が担うトカマク型にくらべて安定な動作が可能になるが、コイルや磁場構造の非軸対称性を含めて、核融合炉内の構造が複雑になるなどの欠点もある。ヘリカル型はコイル形状に応じて様々な磁場・炉設計が可能であるが、実験装置が限られていることもあり、プラズマ輸送や熱負荷の制御などにおいて、体系的な理解が難しい面がある。前述したHモードやプロブ生成といった現象についても、LHDで類似の現象が見つかっているが、磁場構造との関係やトカマク型との相違点について、理論的な解釈は固まっていない。

(1)本研究では、ヘリカル型核融合炉に属する様々な磁場形状に対応した、運動論的な全系解析シミュレーションモデルを構築することを目標としている。このようなモデルにより、従来のシミュレーションで扱うことが困難であったヘリカル周辺領域における乱流現象や、炉心-周辺領域間が結びついた現象の再現が可能になると期待される。また、ヘリカル核融合炉における磁場配位特有の構造として、周辺領域における統計的な磁気面構造がある。これは、外部コイルの各部分からの磁力線がフラクタル的に絡み合っている構造である。明確な磁場構造が失われる分、様々な特徴スケールを持つプラズマの運動論効果がより強く輸送現象を支配している可能性がある。磁場に対するプラズマ応答の非等方性や有限ジャイロ軌道効果を含むジャイロ運動論モデルを適用することで、このようなプラズマ輸送特性が明確になると期待される。

具体的には、XGCを非軸対象な三次元系に一般化し、統計的磁気面構造を含むヘリカル磁場配位に対応した非構造格子系を構築する。また、開発した計算コードをまずLHD

に適用し、炉心領域と周辺領域のそれぞれに対して開発されてきた既存の計算コードとの比較ベンチマークを行う。

(2) 従来のジャイロ運動論コードでは、イオンのダイナミクスをジャイロ運動論モデルに基づいて取り扱い、より小さい時空間スケールをもつ電子ダイナミクスは断熱近似などでモデル化されることが多い。しかし電子スケールの微視的乱流の効果も考慮するため、電子ダイナミクスを陽的に取り入れるモデルも導入され始めている。XGCでは電子の運動方程式のみをより小さい時間ステップで解く sub-cycling 法が実装されているが、時間ステップ間隔が 1/100 ~ 1/10 程度に小さくなるため計算コストが大きく増大する問題がある。また非軸対象なヘリカル核融合炉では、トーラス方向に要求される解像度が高くなり、より多くの計算資源が必要になると予想される。

電子ダイナミクスを含めた、より大規模な計算を目指して、核融合研プラズマシミュレータ(富士通 FX100)に対して、カーネル部分の最適化を行った。現在、「京」コンピュータの後継機(ポスト京)が設計・開発されている。ポスト京における性能を FX100 上で推定するためツールが開発されており、SIMD 幅などの違いがあるものの FX100 で汎用性の高い最適化ができれば、ポスト京でも実効性能の向上が見込まれると考えられる。

3. 研究の方法

(1) ヘリカル核融合炉向けに開発した XGC-S (XGC-Stellarator) では、磁場平衡計算コード VMEC で得られた 3次元平衡データを用いる。このデータは、炉心領域の入れ子状の磁力線構造(磁気面)に対応した磁気座標系で定義されている。Newton 法によって円柱座標系から磁気座標系への逆変換を行い、円柱座標であらわされた格子点上の磁場を計算し、これにスプライン補間を適用することで、任意の位置の磁場を求める。非構造格子については、磁気座標上で離散化した格子点を円柱座標系に変換することで、磁場構造を取り入れたものを構築する。静電・電磁揺動や電荷密度などはこの非構造格子上で表される。粒子-格子間の補間に伴う数値拡散を最小限に抑えることができるよう、回転変換を考慮してトーラス断面ごとに離散化し、磁力線のねじれを追跡するように格子点の位置を定義している。

ヘリカル周辺領域では磁気面のような明確な構造が存在しないため、炉心領域の平衡磁場とは異なった扱いが必要になり、VMEC も炉心部分にのみ適用できる手法である。ここでは、周辺部分の磁場はコイル形状から直接計算し、VMEC で得られた平衡磁場の表面電流を考慮した補正を加える virtual casing 法により、核融合炉内全体の磁場を計算した。この方法により、炉心部分における磁気座標

の情報を残しつつ、周辺領域までなめらかに接続した磁場を使ったシミュレーションを可能にしている。また、非構造格子系は、この磁場構造に対する数値的な磁力線トレースによって構築する。本手法では、磁力線がトーラス断面を横切る点で格子点を定義していくため、磁力線の接続長が長くなる統計的磁気面領域で自然に格子点が多くなり、格子が細分化されるという特徴がある。また、磁力線トレースに伴って得られる、接続長や真空容器壁との連結点といった磁力線固有の情報を各格子点に記録することができるため、磁力線が複雑に絡み合った領域でプラズマ輸送と磁力線公との関係を考察する上で有効な情報となると考えられる。

開発したコードのベンチマークとして、LHD における高速粒子の閉じ込め、および GAM 振動と zonal 流の減衰について既存のシミュレーション結果と比較した。前者については、HINT コードで得られた平衡磁場に対して、高速イオンのドリフト運動を追跡したものである (Seki et al, PFR (2008))。後者は、炉心領域向けの新古典輸送計算コード Fortec-3D (Satake et al, Nuclear Fusion (2007)) とジャイロ運動論コード GT5D (Matsuoka et al, Physics of Plasmas (2018)) を用いている。

(2) ジャイロ運動論粒子コードで、平衡から大きく状態を扱うためには、統計ノイズを十分小さくするために格子あたり数千個の計算粒子が必要になる。このことにより、計算コストの大部分は粒子の運動方程式や、電荷(電流)密度の計算で占められることになる。電子 sub-cycling 法を用いた場合、電子の運動方程式を解く部分が全体の計算時間の 80~90%程度を占める。

Particle-in-cell 法を用いた計算では、一次的に配列した計算粒子データに対して、粒子ごとに独立した処理を進めて行く。そのため、計算の主要部分は計算順序の入れ替えに自由度がある次元ループからなる。このループ内の条件分岐や関数呼び出しを除去、さらにループを多重化することで、SIMD 化やソフトウェアパイプラインによる最適化が適用される最内ループの構造を、外部パラメータによって自在に変形できるようにした。これにより、様々なキャッシュサイズや SIMD 幅を持つアーキテクチャに対して柔軟な最適化が可能になるようにしている。

粒子の運動方程式を解く際のボトルネックの一つは、粒子-格子間の補間に必要になる最近接格子の探索である。非構造格子を用いているため、粒子の周辺にある格子を粒子の内外判定をしながら、最近接格子が見つかるまで順に辿って行くため、ループ構造が条件分岐を含む複雑なものになる。最近接格子探索において、格子の面積が大きい、すなわち粒子が含まれる可能性の高い幾つかの格子に対して、投機的に条件判定を行うことで、

SIMD 化などの最適化が機能するようにした。投機的な条件判定を行う格子数も、外部パラメータによって自由に調整できるようになっている。

4. 研究成果

(1) VMEC 平衡データへの円柱座標系への変換と3次元スプライン補間の適用については、これらを用いた磁力線トレースによって妥当性を検証し、磁力線上の flux label が高精度に保存すること、すなわち磁気面上にトラップされていることを確認した。また、円柱座標上の磁力線トレースと、磁気座標と回転変換から磁力線に追従するように構成した非構造格子系との整合性が取れていることも確かめられた。

周辺部に拡張した平衡磁場とそこでの粒子軌道計算の妥当性を検証するため、炉心領域を起点とした高速粒子(水素イオン)の軌道を計算し核融合炉の容器壁に到達できるかどうかを判定することによって、高速粒子の閉じ込めを評価した。粒子のエネルギーを100KeVとし、初期条件としてトーラス中心からの距離とピッチ角(磁力線方向および直交方向の速度比)を変化させた。シミュレーションの結果、ピッチ角が大きくなるにつれてトーラスを周回する軌道(passing orbit)から、トーラスの一部を往復する軌道(banana orbit)へと遷移し、この両者の間に磁気面を大きく外れる複雑な軌道(chaotic orbit)を取る場合が観測された。炉心部分にある粒子もこのような軌道を取ることで徐々に外側に流出し、炉壁に衝突して損失する。シミュレーションは10[ms]程度まで計算し、損失粒子と初期条件との関係について、既存の研究(Seki et al, PFR (2008))と定量的によく一致する結果が得られた。

静電場の効果を含めた輸送計算として、トーラス小半径方向の電場(径電場)とプラズマとの相互作用を計算した。電場は非構造格子上で磁気面平均を取り、一次元的なプラズマの応答を考える。初期に一樣なプラズマを与えた場合、イオンのトーラス外向きの流れに対して内向きの径電場が発生し、振動しながら両者が釣り合う径電場構造へと緩和する。この時の周波数と(GAM 周波数)と平衡電場(両極性電場)について、新古典輸送コード Fortec-3D(Satake et al, Nuclear Fusion(2007))と一致する結果が得られた。また、径電場とトーラス小半径を周回するプラズマ流(ゾーナル流)との相互作用についても計算した。径電場の緩和後の残存するゾーナル流について、ジャイロ運動論コード GT5D (Matsuoka et al, Physics of Plasmas (2018))と概ね一致することを確認した。

今回比較した3つのシミュレーション研究は、周辺領域を含むが粒子追跡に特化したもの、もしくは炉心領域に特化した輸送コードに基づいている。炉心および周辺領域に関連したこれらの結果を、一つのフレームワー

クで再現するシミュレーションコードは今回が初めてのものである。さらに両者を組み合わせた計算として、炉心領域に残存する両極性電場が高速粒子の閉じ込めに与える影響を評価した。100keV 程度の高いエネルギーを持つイオンは、両極性電場により内向きの力を受けながらトーラス内を運動するため、閉じ込めの改善に寄与するが、エネルギーが低い場合(50KeV)は、旋回軌道に擾乱を与える効果が強くなるため、閉じ込めの劣化につながることを示唆された。

これらの成果は、核融合研究分野において権威ある国際学会である IAEA 主催「核融合エネルギー会議(27th IAEA Fusion Energy Conference (FEC 2018))」に投稿され、正式に受理された。

(2) 最内ループのループ長を変化させながら、FX100 上で実効性能を評価した。ループ長に応じて、性能のボトルネックが変化しており、ループ長が短い場合は浮動小数点演算のレイテンシが大きくなっており、ループ長が長くなるにつれて SIMD 化やソフトウェアパイプラインが適用されレイテンシが急激に小さくなる。逆に、ループ長が長すぎる場合は、キャッシュのレイテンシが大きくなる傾向がある。これはループ間のデータ移動に用いる作業配列が大きくなり、データの局所性が悪くなるためと考えられる。この2つの効果のため、ループ長が1000程度の時に実効性能が極大化することがわかった。これは粒子をおよそ1000個ごとにグループ化することに対応する。最適なループ長は、計算機によって異なるため、性能評価ツール等を使ってポスト京への最適化も検討したい。

最近接格子の探索部分から条件分岐を取り除くことで、カーネル部分のほとんどのループを最適化することができ、粒子のソーティングや上記のループ長最適化などを組み合わせることで、時間ステップループ内の実効性能はピーク性能の20%程度まで向上した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[論文発表] (計7件)

J. F. Ong, T. Moritaka, and H. Takabe, "The suppression of radiation reaction and laser field depletion in laser-electron beam interaction", Physics of Plasmas, 査読有, vol.25, pp.033113 (2018)

N Khasanah, CW Peng, CH Chen, TY Huang, N Bolouki, T. Moritaka, Y Hara, H Shimogawara, T Sano, Y Sakawa, Y Sato, K Tomita, K Uchino, S Matsukiyo, Y Shoji, S Tomita, S Tomiya, R Yamazaki, M Koenig, Y Kuramitsu, "Spatial and temporal plasma

evolutions of magnetic reconnection in laser produced plasmas”
High Energy Density Physics, 査読有, vol.23, pp.15 (2017)

Y. L. Liu, Y. Kuramitsu, T. Moritaka, S.H. Chen, “Transition from coherent to incoherent acceleration of nonthermal relativistic electron induced by an intense light pulse”, High Energy Density Physics, 査読有, vol. 22, pp.46 (2017)

Yoshitaka SHOJI, Ryo YAMAZAKI, Sara TOMITA,..., Toseo MORITAKA,..., “Toward the Generation of Magnetized Collisionless Shocks with High- Power Lasers”, Plasma and Fusion Research, 査読有, vol. 11, pp.3401031 (2016)

Y. Kuramitsu, A. Mizuta, Y. Sakawa, H. Tanji, T. Ide, T. Sano, M. Koenig, A. Ravasio, A. Pelka, H. Takabe, C. D. Gregory, N. Woolsey, T. Moritaka, S. Matsukiyo, Y. Matsumoto and N. Ohnishi, “TIME EVOLUTION of KELVIN-HELMHOLTZ VORTICES ASSOCIATED with COLLISIONLESS SHOCKS in LASER-PRODUCED PLASMAS”, The Astrophysical Journal, 査読有, vol. 828 pp.93 (2016)

J. F. Ong, W. R. Teo, Toseo Moritaka, H. Takabe, “Radiation reaction in the interaction of ultraintense laser with matter and gamma ray source”, Physics of Plasmas, 査読有, vol. 23, pp.53117 (2016)

Toseo Moritaka, “レーザーを用いた磁気リコネクションの研究”レーザー研究, 査読有, vol.44 pp.602 (2016)

〔学会発表〕(計6件)

T. Moritaka, S. Abbott, C-S. Chang, T. Koskela, S. Ku, M. Nunami and S. Ishiguro, “Optimization of the gyrokinetic particle-in-cell code (XGC1) for multi-core CPUs with cache memory”, The 27th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research & The 13th Asia Pacific Plasma Theory Conference, Toki, Japan (2017)

T. Moritaka, R. Hager, M. Cole, C-S. Chang, S. Lazerson, S. Ku, and S. Ishiguro, “ジャイロ運動論粒子コード(X-point Gyrokinetic Code, XGC)のヘリカル配位への応用”Plasma Conference 2017, Himeji, Japan (2017)

T. Moritaka, R. Hager, M. Cole, C-S. Chang, S. Lazerson, S. Ku, and S. Ishiguro

, “Implementation of non-axisymmetric mesh system in the gyrokinetic PIC code (XGC) for Stellarators”, 59th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, Milwaukee, USA (2017)

T. Moritaka, R. Hager, S. Lazerson, C-S. Chang,, S. Ku, and S. Ishiguro, “Development of a Particle-In-Cell Gyrokinetic Code for Stellarator Geometries”, US-Japan Joint Institute for Fusion Theory (JIFT) Workshop on: Multiscale Methods in Plasma Physics, Boulder, USA (2017)

T. Moritaka, S. Abbott, C-S. Chang, T. Koskela, S. Ku, and M. Nunami, “Porting XGC to FX100”, 3rd US-Japan JIFT Workshop on Innovations and co-design of fusion simulations towards extreme scale computing, Kashiwa, Japan (2017)

Toseo Moritaka, Yasuhiro Kuramitsu, Yao-Li Liu and Shih-Hung Chen, “Structure formation of directional plasma flow in a weak perpendicular magnetic field”, 18th International Congress on Plasma Physics (ICPP 2016), Kaohsiung Taiwan (2016)

6. 研究組織

(1)研究代表者

森高 外征雄 (MORITAKA, Toseo)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号：20554372

