

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420851

研究課題名(和文)トロイダルプラズマにおける非線形衝突の高エネルギー粒子閉じ込めへの影響

研究課題名(英文)Effect of nonlinear collisions on the energetic particle confinement in toroidal plasmas

研究代表者

村上 定義 (Murakami, Sadayoshi)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：40249967

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、これまで高エネルギー粒子閉じ込め解析において考慮されていなかった非線形衝突効果、すなわち高エネルギー粒子間衝突の高エネルギー粒子閉じ込めへの影響について、5次元位相空間ドリフト運動論方程式解析コードGNETを非線形衝突効果を取り扱えるように拡張し、研究を行った。結果として、有限軌道効果を含む非線形クーロン衝突によるの粒子輸送を評価できるシミュレーションコードの開発に成功した。

研究成果の概要(英文)：The nonlinear collision operator is formulated in order to study the collision effect between high energy particles. The Monte Carlo collision operator is derived to be easily implemented to the orbit following type code GNET. The benchmark results with TASK/FP show good agreements about the broadening of the beam ion distribution due to the nonlinear collisions between beam ions.

研究分野：プラズマ物理，核融合工学

キーワード：高エネルギー粒子 非線形衝突 シミュレーション トーラスプラズマ

## 1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込め核融合炉では、核融合反応により発生する高エネルギー $\alpha$ 粒子の損失は、第一壁の損傷や $\alpha$ 粒子加熱の減少などを引き起こし、効率的な核融合炉の設計における重要な課題の一つである。軸対称磁場配位であるトカマクでは、高エネルギー $\alpha$ 粒子の閉じ込めは大きな問題とならないが、実際には有限のトロイダルコイルによるリップル磁場や他の原因による3次元磁場が存在する。この3次元磁場の影響で、トロイダル方向の運動量保存が成り立たなくなり、リップル捕捉等により粒子の径方向損失が発生する。このため3次元磁場トカマクにおける $\alpha$ 粒子損失について、多くの研究が行われてきている。また、ヘリカル型核融合炉においても、3次元磁場であることから粒子軌道が複雑になり、高エネルギー粒子閉じ込めの研究が多く進められてきている。

一方、最近の核融合プラズマ実験 [S. Günter, et al., Nucl. Fusion 47, 920 (2007)] において、NBIによって駆動される電流分布が、衝突理論で予測される電流分布と一致しないことが報告された。さらに DIII-D における実験 [W. W. Heidbrink, et al., Phys. Rev. Lett. 103, 175001 (2009)] でも同様な高エネルギー粒子の拡散が観測されている。これらの現象を説明するため微視的な乱流揺動が高エネルギー粒子の異常輸送を引き起こすことが提案されたが、最近の実験研究 [D.C. Pace et al., Phys. Plasmas 20, 0561108 (2013)] により乱流揺動による影響は見られないことが報告された。このことから、他の高エネルギー粒子輸送を引き起こす原因が存在する可能性が示唆されている。

これまでの3次元磁場トカマクやヘリカル型装置における高エネルギー粒子閉じ込めの研究では、クーロン衝突として背景プラズマとの衝突のみを考慮した研究が行われてきている。この場合、高エネルギー $\alpha$ 粒子の速度は、熱粒子イオンに比べ非常に早いので、電子との衝突の影響が大きく、エネルギー減衰過程が中心となり、ピッチ角散乱はほとんど起きない。そのため高エネルギー $\alpha$ 粒子は、ほぼ一定のピッチ角でエネルギー減衰し、通過粒子から捕捉粒子へや捕捉粒子から通過粒子への運動の遷移が起きないと考えられている。しかしながら、高エネルギー $\alpha$ 粒子には、密度は少ないが相対速度がそれほど大きくない粒子、すなわち $\alpha$ 粒子自身が存在する。相対速度のそれほど大きくない $\alpha$ 粒子間の衝突は、粒子閉じ込めに大きな影響を与えるピッチ角散乱を引き起こす可能性がある。また、高エネルギー粒子の密度が増加するにしたがい、その影響は大きくなると考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究では、これまで高エネルギー粒子閉じ込め解析において考慮されていなかった非線形衝突効果、すなわち高エネルギー粒子間衝突の高エネルギー粒子閉じ込めへの影響について、5次元位相空間ドリフト運動論方程式解析コード GNET を非線形衝突効果を取り扱えるように拡張し、研究を行う。われわれは、これまで非線形衝突演算子を定式化し、粒子追跡型モンテカルロ・コードに適したランジュバン型の衝突演算子を導出し、GNET コードへの実装を進めて来ている。

本研究では、まず、この非線形衝突演算子を GNET コードに実装し、様々なベンチマーク等を行い、コードの検証を行う。次に、リップルトカマクやヘリカル磁場配位など理想的な磁場配位およびプラズマでの影響を明らかにする。

高エネルギー粒子の密度や初期エネルギーなどを規格化し、非線形衝突がピッチ角散乱に与える影響について定量的に調べ、解析的にも検証しながら、その影響について明らかにする。合わせて、簡単な理論モデルを構築することを目指し、高エネルギー粒子間衝突の重要な場合が予測できるようにする。その次に、JT-60, DIII-D などトカマク装置や LHD における実験プラズマにおけるビーム粒子損失への影響について検証し、実験結果との比較・検討を行う。高エネルギー粒子間衝突を考慮することにより、ピッチ角散乱がわずかに増加することが予想され、損失コーン境界付近の粒子を損失させる可能性がある。

## 3. 研究の方法

高エネルギー粒子閉じ込めにおける非線形衝突の効果を評価するためには、3次元磁場配位での有限軌道の効果を含むドリフト運動論方程式を考え、これを解く必要がある。このため本研究では、ヘリカル磁場配位など3次元磁場配位において高エネルギー粒子の5次元位相空間におけるドリフト運動論方程式解析コード GNET を整備し研究を行う。

まず5次元位相空間におけるドリフト運動論方程式解析コード GNET に非線形衝突の効果を取り入れたモデルを導入し、拡張を進める。非線形衝突モデルに関しては、われわれはこれまで、GNET コードに取り入れるため、衝突モデルの開発を行ってきた [Y. Masaoka and S. Murakami, Plasma Fusion Res. 8, 2403106 (2013)]. 背景プラズマが非マックスウェル分布の場合における衝突モデルを構築するため、一般的な Rosenbluth ポテンシャルを含む Fokker-Plank 形式の衝突演算子を考え、これを数値計算に適したルジャンドル関数展開した形

式で導出した。しかしながら、このままではモンテカルロ手法を用いる計算コードには適用できないため、あるポテンシャル下でのブラウン運動を記述する微分方程式であるランジュバン形式の Fokker-Planck 方程式と等価な衝突演算子を導出した。これによりテスト粒子のピッチ角散乱とエネルギー散乱を表現することができる。

GNET コードにこの非線形衝突演算子モデルを導入し、正しく計算できていることを検証する。まず、マックスウェル分布の背景プラズマのみを考え、これまで用いてきた Boozer 等による線形衝突モデルとの比較を行い、線形衝突モデルとほぼ同じ結果となることを確認する。次に、異なる温度を持つ 2 成分マックスウェル分布を考える。ここでは、線形衝突モデルによる衝突を 2 回取り入れることで、結果を得ることができる。次に、非線形衝突モデルを用いて、2 成分マックスウェル分布での結果を求め、線形モデルとの結果との比較により、非線形効果が正しく取り扱えていることを確認する。また、われわれの研究室で開発が進められている統合コードの一部である TASK/FP の Fokker-Planck モデルを用いて検証を行う。TASK/FP では、粒子のドリフトや有限軌道の効果は含まれていないが、非線形衝突の効果が入り込まれており、計算結果を比較することにより、GNET コードの検証を行うことができる。

次に、非線形衝突効果を取り入れた GNET コードを用いて、その高エネルギー粒子閉じ込めへの影響を検証する。実際の計算においては、1 回の GNET による計算では、粒子間衝突の相手である高エネルギー粒子の分布が求まっていないため、反復法を用いて、計算を行う必要がある。まず、線形衝突モデルにより高エネルギー粒子の分布  $f_0$  を求める。求めた分布を基に非線形衝突演算子  $C(f_0)$  を計算する。この  $C(f_0)$  を用いて高エネルギー粒子閉じ込めの解析を行ない、分布  $f_1$  を求める。同様にして、 $f_2, f_3, \dots$  を求め、 $f_n$  と  $f_{n-1}$  の分布を比較し、収束するまで繰り返す。これにより最終的な高エネルギー粒子分布および閉じ込めを評価する。

まず、非線形衝突効果の影響について、理想的な磁場配位を（リップルトカマクやヘリカル磁場配位）用いて検証する。NBI 加熱など特定の入射ピッチ角がある場合や核融合反応による  $\alpha$  粒子など特定のピッチ角を持たない場合について考える。高エネルギー粒子の密度や初期エネルギーなどを規格化し、非線形衝突がピッチ角散乱に与える影響について定量的に調べ、解析的にも検証しながら、その影響について明らかにする。合わせて、簡単な理論モデルを構築することを目指し、高エネルギー粒子間

衝突の重要な場合が予測できるようにする。次に、DIII-D、JT-60 などトカマク装置や LHD における実験プラズマにおけるビーム粒子損失への影響について検証する。

## 4. 研究成果

### (1) 主な成果

本研究では、これまで高エネルギー粒子閉じ込め解析において考慮されていなかった非線形衝突効果、すなわち高エネルギー粒子間衝突の高エネルギー粒子閉じ込めへの影響について、5 次元位相空間ドリフト運動論方程式解析コード GNET を拡張し、研究を行う。まず GNET コードに非線形衝突の効果を取り入れたモデルの導出を行った。非線形モデルに関しては、GNET に取り入れるため、あるポテンシャル下でのブラウン運動を記述する微分方程式であるランジュバン形式の Fokker-Planck 方程式と等価な衝突演算子を導出している。この非線形衝突モデルを GNET コードに導入し、正しく計算できていることを検証した。まず、マックスウェル分布の背景プラズマのみを考え、これまで用いてきた Boozer 等による線形衝突モデルとの比較を行い、線形衝突モデルとほぼ同じ結果となることを確認した。次に、異なる温度を持つ 2 成分マックスウェル分布を考え、非線形衝突モデルを用いた場合と 2 つの線形衝突モデルを合わせた場合との結果の比較を行い、ほぼ同じ結果となることを確認した。

さらに GNET コードに導入した非線形衝突モデルについて流体型の Fokker-Planck 解析コード TASK/FP とのベンチマークを行った。GNET コードにおいて粒子軌道の効果を取り除き、単位体積の立方体に高エネルギービームイオンを発生させ、その場合のビームイオンのエネルギー減衰分布のビームパワー依存性について、得られた結果を比較した。結果として、ビームパワーを増加せると高エネルギー粒子間の衝突頻度が大きくなり、非線形衝突効果による分布の広がりが見られた。

しかしながら、詳細に比較を進めるとビーム入射角度からの広がりは、良く一致しないことが分かった。原因の 1 つとして考えられるのは、TASK/FP において用いられているルジャンドル展開が低次までしか用いられていないためだと考えられた。このため低次のルジャンドル展開を仮定したモデルを導入し、比較を行ったが定量的に良い一致が得られなかった。しかしながら、ビーム粒子入射に関する規格化等を再度確認し、作業を行った結果、原因となる点分かり、最終的に定量的にも良い一致を得ることが出来た。図 1 は、入射角 60 度で入射されたビームイオンのピッチ角 60 度、90 度にお

ける規格化された速度空間分布である。GNET と TASK/FP の結果は、比較的良い一致を示している。

現在、より現実的な配位における非線形衝突効果の検証を進めている。NBI 加熱など特定の入射ピッチ角がある場合や核融合反応による  $\alpha$  粒子など特定のピッチ角を持たない場合について考え、高エネルギー粒子の密度や初期エネルギーなどを規格化し、非線形衝突がピッチ角散乱に与える影響について定量的に調べ、解析的にも検証を進めている。

この他、この非線形高エネルギー粒子間衝突演算子を応用し、LHD 重水素実験における重水素ビーム間の核融合反応の評価を行うことに成功した。これまで評価されていなかった、有限軌道幅を含む高エネルギー粒子間の核融合核融合反応を含む中性子発生量を定量的に評価できた。さらに、NBI 加熱の時間変化など中性子発生量の時間的変化を求めることに成功した。また、GNET コードを拡張するため背景プラズマの多粒子化等の改良を進めた。これらの研究成果は、国際会議等で発表するとともに、論文として投稿・掲載された。

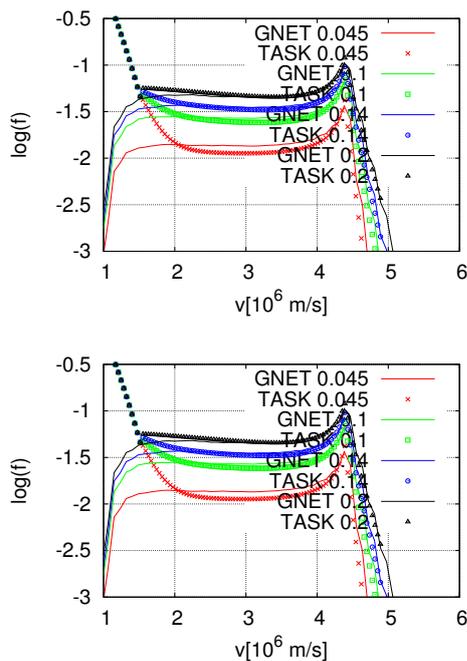


Figure 1: 入射角 60 度で入射されたビームイオンのピッチ角 60 度、90 度における規格化された速度空間分布

## (2) 成果の国内外での位置付けとインパクト

本研究により、5次元位相空間におけるドリフト運動論方程式解析コード GNET に非線形衝突の効果を取り入れたモデルを導入し、有限軌道効果を含む

非線形クーロン衝突によるの粒子輸送を評価できるシミュレーションコードの開発に成功した。これまで有限軌道幅を無視した磁気面内の速度空間のみを考慮した方程式により解析が行われてきており、本研究により、世界的に見ても初めて径方向の拡散が正しく考慮された高エネルギー粒子輸送の評価を行うことが可能となった。また、本研究を基礎として、高エネルギー粒子間の核融合反応を評価できる GNET コードの開発も進めることができた。

## (3) 今後の展望

DIII-D, JT-60 などトカマク装置や LHD における実験プラズマにおけるビーム粒子損失への影響について未だ検証が十分終わっていないため、今後さらに解析を進め結果をまとめる予定である。特に、DIII-D 配位では、高エネルギー粒子の異常拡散が発生した場合と同様なプラズマを仮定し、シミュレーションを行う。磁場配位としては、有限リップルを考慮した 3 次元磁場配位を用いる。今後さらに解析を進め結果をまとめる予定である。これらの結果は、国際的なジャーナルに投稿する予定である。また、ITER や DEMO など核融合装置における  $\alpha$  粒子閉じ込めへの影響を検証する。ITER や DEMO における実験シナリオを想定したプラズマパラメータを仮定し、GNET コードを用いて、シミュレーションを行う。

一方、高エネルギー粒子間の核融合反応を評価できる GNET コードについては、今後、LHD 重水素実験プラズマや JT60SA などの中性子発生量に関連する物理的問題に適用し、これまで明らかにされていない、有限軌道幅の効果などを評価する予定である。

## 5. 主な発表論文等

### ① 【雑誌論文】 (計 9 件)

- [1] M. Homma, S. Murakami, H. Nuga and H. Yamaguchi Estimations of Beam-Beam Fusion Reaction Rates in the Deuterium Plasma Experiment on LHD, Plasma Fusion Res., 査読有, **11**, 2016, 2403109, DOI: 10.1585/pfr.11.2403109
- [2] H. Yamaguchi and S. Murakami, NBI Beam Ion Distributions in the Presence of Magnetic Islands in Helical Plasmas, Plasma Fusion Res., 査読有, **11**, 2016, 2403094, DOI: 10.1585/pfr.11.2403094
- [3] S. Murakami et al., Integrated Simulation of Deuterium Experiment Plasma in LHD, Proc. 26th IAEA Fusion Energy Conference, 査読無, (2016) TH/P2-21.
- [4] S. Murakami, K. Itoh, L.J. Zheng, J.W. Van Dam, P. Bonoli, J.E. Rice, C.L. Fiore, C. Gao, and A. Fukuyama, Study of Toroidal Flow Generation by the ICRF Minority Heating in the Alcator C-Mod Plasma, Phys. Plasmas, 査読有, **23** (2016) 012501, DOI:10.1063/1.4939214
- [5] H. Yamaguchi and S. Murakami, Simulation study of NBI heating in the time-evolving and multi-ion-species plasmas of LHD, Nuclear Fusion, , 査読有, **56** (2015) 026003, DOI: 10.1088/0029-5515/56/2/026003
- [6] S. Murakami, K. Itoh, L.J. Zheng, J.W. Van Dam, and A. Fukuyama, Simulation Study of Toroidal Flow Generation of Minority Ions by Local ICRF Heating, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, **84** (2015) 123501, DOI:10.7566/JPSJ.84.123501
- [7] M. Homma and S. Murakami, Simulation Study of Energetic Triton Confinement in the D-D Experiment on LHD, Plasma Fusion Res., 査読有, **10**, 2015, 3403050, DOI: 10.1585/pfr.10.3403050
- [8] S. Murakami, S. Hasegawa and Y. Moriya, Development of Momentum Conserving Monte Carlo Simulation Code for ECCD Study in Helical Plasmas, EPJ Web of

Conferences, 査読無, **87** (2015) 01010, DOI: 10.1051/epjconf/20158701010

- [9] S. Murakami, Y. Masaoka, Europhysics Conference Abstracts: Proceedings of 41st EPS Conference on Plasma Physics, Proc. 41th EPS Conf. Plasma Phys., 査読無, 2014, **P4.013**, <http://ocs.ciemat.es/EPS2014PAP/html/>

### ② 【学会発表】 (計 1 8 件)

- [1] S. Murakami, et al., Integrated Simulation of Deuterium Experiment Plasma in LHD, Proc. 26th IAEA Fusion Energy Conference, 京都, 2016.10.18, **TH/P2-21**.
- [2] S. Murakami, et al., Integrated Simulation of Triton Burn-up in the Deuterium Experiment of LHD, 17th ITPA TG meeting on Energetic Particle, 京都, 2016.10.25.
- [3] 村上定義, 他, 高エネルギー粒子挙動に関する研究課題 (シンポジウム II), プラズマ・核融合学会第 3 3 回年会, 仙台, 2016.11.29, **S2-5**.
- [4] 前田渉吾, 村上定義, 他統合輸送シミュレーションによる LHD プラズマの熱・粒子輸送モデリング, プラズマ・核融合学会第 3 3 回年会, 仙台, 2016.11.29, **29aP52**.
- [5] 齋藤泰之, 村上定義, 山口裕之, 本間雅之 LHD 重水素実験における核融合反応の時間発展シミュレーション, プラズマ・核融合学会第 3 3 回年会, 仙台, 2016.12.01, **01pB05**.
- [6] S. Murakami, et al., Integrated Simulation Studies of Plasma Performances and Fusion Reactions in the Deuterium Experiment of LHD, 58th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, San Jose USA, 2016.11.02, **PO4-3**.
- [7] S. Murakami, et al., Predictions of Plasma Performance and Fusion Reactions in the Deuterium Experiment Plasma of LHD, 25th International TOKI Conference, 土岐, 2015.11.05, **I-11**.
- [8] H. Yamaguchi and S. Murakami, NBI Beam Ion Distributions in the Presence of Magnetic Islands in Helical Plasmas, 25th International TOKI Conference, 土岐, 2015.11.05, **P1-107**.

- [9] M. Homma, S. Murakami, H. Nuga and H. Yamaguchi Estimations of Beam-Beam Fusion Reaction Rates in the Deuterium Plasma Experiment on LHD, 25th International TOKI Conference, 土岐, 2015.11.05, **P2-42**.
- [10] S. Murakami, et al., Simulation Study of the Deuterium Experiment Plasma of LHD by TASK3D and GNET, 20th International Stellarator-Heliotron Workshop, 2015.10.06, **P1S2-23**.
- [11] S. Murakami, Y. Masaoka, H. Yamaguchi, M. Homma, H. Nuga and A. Fukuyama, Development of nonlinear collision operator for the Monte Carlo simulation code in toroidal plasmas, 14th IAEA Technical Meeting on Energetic Particles in Magnetic Confinement Systems, Vienna, 2015.09.02, **P-10**.
- [12] M. Homma and S. Murakami, Simulation Study of Triton Confinement and Nuclear Reaction in the Deuterium Plasma Experiment at LHD, 14th IAEA Technical Meeting on Energetic Particles in Magnetic Confinement Systems, Vienna, 2015.09.02, **P-8**.
- [13] S. Murakami, Y. Masaoka and A. Fukuyama Benchmark Study of Nonlinear Collision Operator for the Monte Carlo Simulation in Toroidal Plasmas, 24th International TOKI Conference, 土岐, 2014.11.05.
- [14] S. Murakami, et al., Drift kinetic simulation of ICRF minority heating by GNET, ITPA Meeting on Energetic Particle 2014, Padova, 2014-10-21.
- [15] S. Murakami, et al., Integrated Heat Transport Simulation of High Ion Temperature Plasma of LHD, 25th IAEA Fusion Energy Conference, St. Petersburg, 2014-10-16, **TH/P6-38**.
- [16] S. Murakami, et al., Integrated Transport Simulation of High Ion Temperature Plasma of LHD, Joint Varenna-Lausanne International Workshop on "Theory of Fusion Plasmas", Varenna, 2014-09-01, **I-6**.
- [17] S. Murakami and Y. Masaoka, Development of nonlinear operator for the Monte Carlo code in toroidal plasmas 41st EPS Conference on Plasma Physics, Berlin, 2014-06-26, **P4-13**.
- [18] S. Murakami, S. Hasegawa and Y. Moriya, Development of Momentum Conserving Monte Carlo Simulation Code for ECCD Study in Helical Plasmas, 18th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating, 奈良, 2014-04-23.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

村上 定義 (Sadayoshi Murakami)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：40249967