

平成 21 年 6 月 1 日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18760647
 研究課題名（和文） グローバルジャイロ運動論的ブラゾフコードによる駆動乱流の研究
 研究課題名（英文） Study of driven turbulence using global gyrokinetic Vlasov code

研究代表者
 井戸村 泰宏（IDOMURA YASUHIRO）
 独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究副主幹
 研究者番号：00354580

研究成果の概要：

本研究では、粒子衝突効果や熱源を伴う新しいグローバルジャイロ運動論的ブラゾフコードを開発した。これにより外部加熱や核融合反応による熱源で駆動される開放系トーラスプラズマにおけるイオン系乱流およびプラズマ分布形成の長時間発展をシミュレーションすることに初めて成功し、実験的に観測されている温度分布の硬直性、間欠的輸送現象、および、自発的プラズマ回転等に関して乱流輸送特性を明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	700,000	0	700,000
2007 年度	600,000	0	600,000
2008 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	2,300,000	300,000	2,600,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：ジャイロ運動論、ブラゾフコード、イオン温度勾配駆動乱流、新古典理論、フォッカープランク演算子、自己組織化臨界現象

1. 研究開始当初の背景

(1) 研究の全体構想

核融合プラズマにおける閉じ込め性能は乱流輸送現象によって決まっており、その解明、制御手法の開発は将来の定常核融合炉の成立性に関わる重要な問題である。本研究では、磁化プラズマにおける乱流輸送現象を最も厳密に記述する標準的モデルであるジャイロ運動論に基づく第一原理計算によって、①トーラスプラズマにおける乱流輸送現象を物理的に解明する。

②実験室プラズマの閉じ込め性能を定量的

に予測できる包括的シミュレーションを開発する。

ことを主な目的として研究開発を進めている。

(2) 本研究課題に着想した背景

本研究では研究開始以前にグローバルジャイロ運動論的粒子コードを開発し、イオン熱輸送の原因と考えられている ITG(イオン温度勾配駆動)乱流、そして、電子熱輸送の原因と考えられている TEM(捕捉電子モード)乱流および ETG(電子温度勾配駆動)乱流のシミュレーション研究を推進していた。この研

究では計算資源の制約から5次元の位相空間の粒子分布関数を離散的な点で表現する粒子モデルを用いてきたが、粒子モデルで用いられる δf 法は熱・粒子源や粒子衝突効果を含まない保存系プラズマに対する計算手法であるため、シミュレーションは本質的に線形不安定な初期条件から線形安定な状態へ系が緩和していく減衰乱流シミュレーションであった。このような減衰乱流シミュレーションは、微視的不安定性の飽和機構や非線形状態の乱流構造を調べる上で部分的に有効であるが、

①外部加熱や核燃焼が支える駆動乱流の準定常状態における乱流輸送係数の定量的評価が困難。

②輸送障壁形成のような分布形成を伴う遷移現象を取り扱うことができない。

③粒子衝突効果とそれによる新古典輸送現象の取り扱いが難しい。

といった大きな問題を抱えていた。こういった問題を解決するには、熱・粒子源や粒子衝突効果を含む非保存系プラズマの駆動乱流シミュレーションを開発する必要がある。ジャイロ運動論方程式のもう一つの有効な計算手法である位相流体モデル(ブラゾフコード)はこのような非保存系の物理に対して拡張性があるが、5次元の位相空間をメッシュで表現するために膨大な計算資源が必要となる。このため、研究開始以前のほとんどのブラゾフコードは一本の磁力線に沿った局所領域をモデル化したフラックスチューブシミュレーションであった。しかしながら、近年のスーパーコンピュータの急速な発展に伴い、ブラゾフコードでも大局的な平衡分布の変化まで矛盾なく取り扱うグローバルシミュレーションが視野に入ってきてきたため、本研究課題に着想した。

2. 研究の目的

本研究課題では、上記問題を解決するためにグローバルジャイロ運動論的ブラゾフコードを開発する。このコードにより実験条件に近い開放系トーラスプラズマにおける長時間スケールのイオン系乱流シミュレーションを実現し、実験的観測に対するコードの定性的なValidationを行う。また、新古典輸送現象や分布形成といった、長時間スケールの現象が乱流輸送に与える影響を解明する。

3. 研究の方法

本研究課題では、以下に示す手順で段階的にグローバルジャイロ運動論的ブラゾフコードを開発し、駆動乱流のシミュレーション研究を進める。

(1) スラブ配位のジャイロ運動論的ブラゾフコードにおいて、新しい高精度数値スキーム

の開発を行い、長時間乱流計算における数値特性を検証する。

(2) 上記コードをトーラス配位に拡張し、従来の粒子コードとのベンチマークによってコードのVerificationを行う。

(3) 粒子衝突項を実装し、新古典輸送現象のベンチマークを行い、粒子衝突項のVerificationを行う。

(4) 磁場配位の実形状への拡張、および、熱源モデルの実装によって、実験条件での乱流シミュレーションを実現し、コードを完成させる。

(5) 開発したコードによって開放系トーラスプラズマにおける長時間スケールのイオン系乱流シミュレーションを行い、その輸送特性を調べるとともに、実験的観測との比較からコードの定性的なValidationを行う。

4. 研究成果

本研究課題で以下の成果を得た。

(1) 高精度かつロバーストな無散逸・保存型スキームを新たに開発し、従来の粒子コードに比べて飛躍的に高精度な乱流シミュレーションが可能であることを示した。これによって、長時間スケールのジャイロ運動論シミュレーションの可能性が初めて実証された。

(2) トーラス配位のグローバルジャイロ運動論的ブラゾフコードの開発に成功し、粒子コードとのベンチマークにより定量的なVerificationを行った。また、このベンチマークではイオン系乱流の大域解を2つの異なるアプローチで同定することに初めて成功した。

(3) 粒子衝突効果を線形フォッカープランク衝突演算子により実装し、新古典輸送現象のベンチマークに成功した。これによって、従来は無衝突極限で行われてきたプラズマ乱流シミュレーションにおいて粒子衝突効果を含めることを可能にし、特に、新古典輸送現象で決まるプラズマ中の径方向電場(平均流)の効果を取り扱うことに初めて成功した。

(4) 実験条件に基づく熱源モデルを開発し、開放系トーラスプラズマにおけるイオン系乱流とプラズマ分布の時間発展を乱流相関時間の約千倍という長時間スケールにわたってシミュレーションすることに初めて成功した。このシミュレーションで

①温度分布の硬直性

②乱流輸送による間欠的な熱流束

③自発的プラズマ回転の形成

といった実験的に観測されている乱流輸送特性を初めて第一原理モデルで再現し、コードの定性的なValidationに成功した。

(5) 上記シミュレーションにおいて、以下の乱流輸送特性、および、その物理機構を初めて明らかにした。

- ①温度分布を制限する臨界温度勾配は新古典輸送現象によって決まる径方向電場の影響によって与えられる。
- ②温度分布が臨界温度勾配付近に制限された状態で、間欠的な熱流束の雪崩現象が発生する。また、そのパワースペクトルは $1/f$ のべき乗則を示すことから、自己組織化臨界現象が駆動乱流の輸送特性を支配している。
- ③運動量束は運動量勾配と逆向きの非拡散的輸送特性を示す。また、その向きは径方向電場シアの符号によって決まることから、電場シアによる乱流スペクトルのシフトが非拡散的運動量輸送において重要である。

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)

[雑誌論文] (計 8 件)

1. Y. Idomura, M. Ida, T. Kano, N. Aiba, and S. Tokuda, Conservative global gyrokinetic toroidal full-f five dimensional Vlasov simulation, *Comput. Phys. Commun.*, 179, 391-403 (2008), 査読有
 2. Y. Idomura, M. Ida, and S. Tokuda, Conservative gyrokinetic Vlasov simulation, *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.*, 13, 227-233 (2008), 査読有
 3. Y. Idomura, M. Ida, S. Tokuda, and L. Villard, New conservative gyrokinetic full-f Vlasov code and its comparison to gyrokinetic^{TMF} particle-in-cell code, *J. Comput. Phys.*, 226, 244-262 (2007), 査読有
 4. M. Lesur, Y. Idomura, and S. Tokuda, Kinetic simulations of electrostatic plasma waves using Cubic-Interpolated-Propagation scheme, *IAEA-Research*, 2006-089 (2007), 査読有
 5. S. Jolliet, A. Bottino, P. Angelino, R. Hatzky, T. M. Tran, B. F. Mcmillan, O. Sauter, Y. Idomura, and L. Villard, A global collisionless PIC code in magnetic coordinates, *Comput. Phys. Commun.* 177, 409-425 (2007), 査読有
 6. G. Rewoldt, Z. Lin, and Y. Idomura, Linear comparison of gyrokinetic codes with trapped electrons, *Comput. Phys. Commun.* 177, 775-780 (2007), 査読有
 7. Y. Idomura, Self-organization in electron temperature gradient driven turbulence, *Phys. Plasmas*, 13, 080701 (2006), 査読有
 8. Y. Idomura, T.-H. Watanabe, and H. Sugama, Kinetic simulations of turbulent fusion plasmas, *Comptes Rendus Physique*, 7, 650-669 (2006), 査読有
- [学会発表] (計 28 件)
1. Y. Idomura, Long time simulation of ion temperature gradient driven turbulence using full-f gyrokinetic Vlasov code, 14th NEXT Workshop, 9-11 March 2009, Kyoto, Japan (oral).
 2. Y. Idomura, Present status of gyrokinetic full-f Vlasov simulation, US-DOE Workshop on "Scientific Grand Challenges in Fusion Energy Sciences and the Role of Computing at the Extreme Scale", 18-20 March 2009, Washington, DC, USA (invited).
 3. M. Lesur, Y. Idomura, and X. Garbet, Nonlinear features of the energetic beam-driven instability, 14th NEXT Workshop, 9-11 March 2009, Kyoto, Japan (oral).
 4. 井戸村泰宏、ジャイロ運動論的 full-f ブラゾフコードによるトカマク乱流シミュレーション、日本物理学会第 64 回年会、2009 年 3 月 27 日、東京 (oral)
 5. Y. Idomura, Gyrokinetic toroidal full-f Vlasov simulation using non-dissipative conservative scheme, 2nd Simulation Science Symposium, 24-25 September 2008, Tajimi, Japan (invited).
 6. Y. Idomura, S. Tokuda, N. Aiba, and H. Urano, Conservative Global Gyrokinetic Toroidal Full-f 5D Vlasov Simulation, 22nd IAEA Fusion Energy Conference, 13-18 October 2008, Geneva, Switzerland (International Atomic Energy Agency, Vienna, 2008), IAEA-CN-165/TH/8-2 (oral).
 7. H. Urano, Y. Sakamoto, T. Suzuki, T. Fujita, K. Kamiya, A. Isayama, Y. Kamada, H. Takenaga, N. Oyama, G. Matsunaga, S. Ide, Y. Idomura and the JT-60 Team, Heat transport and pedestal structure of H-mode in the variation of current density profiles in JT-60U, 22nd IAEA Fusion Energy Conference, 13-18 October 2008, Geneva, Switzerland (International Atomic Energy Agency, Vienna, 2008), IAEA-CN-165/EX/8-5 (oral).
 8. 井戸村泰宏、徳田伸二、井田真人、相羽信行、叶野琢磨、Numerical verification of conservative

- gyrokinetic toroidal full-f Vlasov code、第13回数値トカマク研究会、2008年3月12日、京都 (oral)
9. 井戸村泰宏、浦野創、相羽信行、徳田伸二、ジャイロ運動論的 full-f ブラゾフコードによるイオン温度勾配駆動乱流の長時間シミュレーション、プラズマ核融合学会第25回年会、2008年12月2日、宇都宮 (oral)
 10. Y. Idomura, M. Ida, S. Tokuda, and L. Villard, Conservative gyrokinetic full-f Vlasov simulation, JIFT Workshop on "Gyrokinetic Simulation of Ion and Electron Temperature Gradient-Driven Transport", 10-12 January 2007, San Diego, USA (oral).
 11. Y. Idomura, T. Kano, M. Ida, S. Tokuda, and M. Machida, Performances of first principle fusion plasma turbulence simulations on SX and Altix, 16th CCSE Workshop on High Performance Computing on Vector Based Architectures -Recent Achievements and Future Directions-, 23 April 2007, Tokyo, Japan (oral).
 12. Y. Idomura, M. Ida, and S. Tokuda, Gyrokinetic Toroidal full-f 5D Vlasov code GT5D, 34th EPS Plasma Physics Conference, 2-6 July 2007, Warsaw, Poland, p4.040 (poster).
 13. Y. Idomura, First principles in nonlinear gyrokinetic simulations, Festival de Theorie 2007, 2-20 July 2007, Aix-en-Provence, France (invited).
 14. Y. Idomura, Kinetic simulations of turbulent fusion plasmas, First International Summer School on ITER Physics: Turbulence and Transport in Tokamaks, 16-20 July 2007, Aix-en-Provence, France (invited).
 15. Y. Idomura, First principles based conservative gyrokinetic toroidal full-f 5D Vlasov simulation, 2nd Japan-Korea workshop on 'Theory and Simulation of Magnetic Fusion Plasmas', 6-8 August 2007, Fukuoka, Japan (oral).
 16. Y. Idomura, First principles based gyrokinetic toroidal full-f Vlasov simulation, JIFT Workshop on "Gyrokinetic Simulation of Plasma Transport: Physics of Anomalous Fluxes of Momentum and Energy", 24-25 September 2007, Kashiwa, Japan (oral).
 17. S. Jolliet, B.F. Mcmillan, T.M. Tran, X. Lapillonne, L. Villard, A. Bottino, P. Angelino, and Y. Idomura, Nonlinear global gyrokinetic PIC simulations of collisionless TEM turbulence, 49th APS Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, 11-15 November 2007, Orlando, USA (poster).
 18. 井戸村泰宏、トカマクプラズマにおける電子温度勾配駆動乱流と帯状流のシミュレーション、東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会、仙台"プラズマフォーラム"、2007年2月23日、仙台 (oral)
 19. 井戸村泰宏、井田真人、徳田伸二、保存型ジャイロ運動論的 full-f ブラゾフコードの開発、第12回数値トカマク研究会、2007年3月2日、京都 (oral)
 20. 井戸村泰宏、井田真人、徳田伸二、核融合プラズマ乱流のジャイロ運動論的シミュレーション Part 2: 電子乱流における帯状流の自己組織化、日本流体力学会年会 2007、2007年8月6日、東京 (oral)
 21. 井戸村泰宏、核融合プラズマ乱流の第一原理シミュレーション、次世代スーパーコンピューティングシンポジウム 2007、2007年10月3日、東京 (invited)
 22. 井田真人、井戸村泰宏、徳田伸二、保存型ジャイロ運動論的 Vlasov コードの開発とその核融合プラズマ乱流シミュレーションへの応用、第22回東大生研 TSPD (Turbulence Simulation and Flow Design) シンポジウム "乱流シミュレーションと流れの設計"、2007年3月1日、東京 (oral)
 23. 井田真人、井戸村泰宏、徳田伸二、核融合プラズマ乱流のジャイロ運動論的シミュレーション Part 1: モデリングと計算手法、日本流体力学会年会 2007、2007年8月6日、東京 (oral)
 24. Y. Idomura, M. Ida, S. Tokuda, and L. Villard, Conservative gyrokinetic Vlasov simulation using Morinishi scheme, 33rd EPS Plasma Physics Conference, 19-23 June 2006, Rome, Italy, 03.004 (oral).
 25. Y. Idomura, Large scale simulations of turbulent fusion plasmas, International Supercomputer Conference 2006, 27-30 June 2006, Dresden, Germany (invited).
 26. Y. Idomura, M. Ida, S. Tokuda, and L. Villard, New conservative gyrokinetic Vlasov code and its comparison to gyrokinetic δf particle-in-cell code, Vlasovia2006, 18-20 September 2006, Florence, Italy (oral).

27. 井戸村泰宏、核融合プラズマ乱流の第一原理シミュレーション、サイエンティフィックシステム研究会 HPC フォーラム 2006、2006年8月29日、東京 (invited)
28. 井戸村泰宏、井田真人、徳田伸二、Laurent Villard、保存系ジャイロ運動論的ブラゾフコードの開発、プラズマ・核融合学会第23回年会、2006年11月28日、つくば (oral)

〔図書〕 (計1件)

1. Y. Idomura, T.-H. Watanabe, and H. Sugama, Kinetic simulations of turbulent fusion plasmas, "Turbulent Transport in Fusion Plasmas - First ITER International Summer School" (AIP, New York, 2008), 270-286 (2008).

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www-jt60.naka.jaea.go.jp/theory/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井戸村 泰宏 (IDOMURA YASUHIRO)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究副主幹

研究者番号：00354580

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし