

平成 21 年 5 月 1 日現在

研究種目：基盤研究（B）  
 研究期間：2005～2008  
 課題番号：17360445  
 研究課題名（和文） プラズマ乱流及び新古典輸送における 5 次元位相空間分布関数のシミュレーション解析  
 研究課題名（英文） Simulation study on five-dimensional phase-space distribution functions in plasma turbulent and neoclassical transport  
 研究代表者  
 渡邊 智彦（WATANABE TOMO-HIKO）  
 核融合科学研究所・シミュレーション科学研究部・准教授  
 研究者番号：30260053

研究成果の概要：独自に開発したコードを用いた大規模計算機シミュレーションによって、磁場閉じ込め核融合プラズマにおける巨視的輸送現象を、プラズマを構成する粒子がどこに、どのような速度で、どのくらい存在するかを表す関数—いわゆる分布関数—の構造という微視的レベルから捉えることに成功した。特に、ヘリカル型核融合プラズマの閉じ込め性能向上につながる有用な理論的指針が示され、乱流輸送シミュレーションによりその妥当性がはじめて確認された。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005 年度	1,500,000	0	1,500,000
2006 年度	1,700,000	0	1,700,000
2007 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2008 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
総計	5,600,000	720,000	6,320,000

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：プラズマ物理、核融合、乱流、輸送、シミュレーション、計算物理

## 1. 研究開始当初の背景

磁場に閉じ込められたプラズマは、不安定性を介して自然に発生する電磁場、密度、流れ場等の乱れにより、外部に漏れ出て行く。これを異常輸送と呼ぶ。その原因の理解と予測・制御が核融合研究の重要テーマであり、実験および理論研究が各国で活発に進められている。特に熱的平衡状態からかけ離れた高温プラズマでは、その乱れや揺動は、実際の空間だけでなく粒子運動の速度を表す速度空間（これらをあわせて「位相空間」と呼

ぶ)にも生ずる。そのため、プラズマ自身が作り出した乱流場との相互作用を含め、粒子分布関数の揺動を自己無撞着に調べることが必要となる。このために通常の流体乱流輸送に比べプラズマの異常輸送研究は遥かに困難なものとなる。一方、トカマクやヘリカル系プラズマで近年発見された種々の閉じ込め改善モードにおいては、乱流に伴う揺動の大幅な減少が観測され、粒子間2体衝突に基づいた新古典輸送理論から予測されるのと同程度以下のレベルまで輸送係数が低減

する場合があることが確認されている。しかし、磁気軸近傍の特異な粒子軌道や、輸送に伴う系電場の形成に関する定量的な予測を行うには、有限粒子軌道幅を考慮した摂動分布関数についての大域的な解析が必要とされ、従来の新古典輸送理論を拡張する必要がある。

このように、本研究開始当初の背景として、磁場閉じ込めプラズマの輸送研究の2本柱である、異常輸送・新古典輸送研究のいずれにおいても、多次元位相空間における摂動（揺動）分布関数の解析が鍵となっており、そのための有効なアプローチの開拓が喫緊の課題であった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、第一原理に基づいた分布関数の直接数値シミュレーションを用いて、磁場閉じ込めプラズマにおける輸送機構の解明・輸送レベルの予測、プラズマ閉じこめ改善条件の探求を行うこと、及び、そのための手法を開発することである。具体的には、5次元位相空間上での分布関数の時間発展を追跡するジャイロ運動論的ヴラソフシミュレーションにより、イオンや電子温度勾配 (ITG/ETG) 乱流による異常輸送量の評価、乱流中での分布関数構造、ゾーナルフローと乱流渦の相互作用、乱流輸送に対する電磁揺動の効果、などの研究を行う。さらに、加熱および粒子補給のあるトーラス系における新古典輸送を与える分布関数の新解析手法を開発し、磁気軸近傍での新古典輸送係数の定量的評価、有限軌道幅効果による径電場形成などについての研究を行う。

## 3. 研究の方法

### (1) ITG乱流のジャイロ運動論的ヴラソフシミュレーション

トロイダル形状の3次元実空間とジャイロ位相について平均化された2次元速度空間とで構成される計5次元の位相空間において、ジャイロ運動論的方程式により与えられるイオン速度分布関数の時間発展を数値的に追跡するジャイロ運動論的ヴラソフシミュレーション手法を確立し、静電トロイダルITG乱流輸送の研究を進展させる。

本研究課題で開発したジャイロ運動論的シミュレーションコード (GKVコード) においては、磁力線に沿ったフラックス・チューブ座標を採用してITGモードのバルーニング構造を精度良く再現するだけでなく、速度空間上の微細な分布関数構造をも精度よく解析でき

るように工夫されている。

ここに、弱いながらも有限のモデル衝突項を導入して、統計的に定常な乱流状態を再現し、乱流によるイオン熱輸送係数とその磁場配位依存性、静電ポテンシャル揺動とゾーナルフロー特性、分布関数の位相空間構造を詳細に調べることができた。また、輸送の間欠的な変動や、ゾーナルフローと乱流の相互作用にも着目し、トロイダルITG乱流の解析をおこなった。

### (2) ジャイロ運動論的ヴラソフシミュレーション・コードの拡張

本研究課題で開発してきたGKVコードは、電場ドリフトによる対流項の評価にはスペクトル法を採用し、また、磁力線に平行方向の座標および速度空間座標についての微分は差分近似を用いて計算している。本研究課題では、世界最高の位相空間解像度を有する5次元ジャイロ運動論的シミュレーションを実行し、乱流中でのエントロピー・バランスを満足し、かつ、分布関数の位相空間構造を精度良く再現することができた。従来にない大規模なシミュレーションを実現するため、核融合科学研究所のスーパーコンピュータおよび地球シミュレータ上での高効率計算が可能となるようにGKVコードの超並列化と最適化を行った。

さらにトカマク型配位のみならずLHDプラズマをはじめとしたヘリカル型装置にも適用できるようにGKVコードの拡張を順次進め、ヘリカル系におけるゾーナルフローとITG乱流の解析を世界に先駆けて進めた。

### (3) 新古典輸送の解析手法の開発

新古典輸送解析で有名なDKESコードは、ドリフト運動論方程式の定常解を数値的に求める手法であるが、有限軌道幅効果は考慮されていない。それ故に径方向に局所的な取り扱いしかできず、磁気軸近傍領域の解析などには限界がある。有限軌道幅効果を取り入れたドリフト運動論方程式を数値的に求めることのできる手法を開発し、ヘリカル系における測地的音響モード (GAM) の解析を進めた。

## 4. 研究成果

### (1) トロイダル配位でのジャイロ運動論的シミュレーション・コードの開発

トカマクおよびヘリカル配位に適用可能なジャイロ運動論的シミュレーション・コードGKVを開発し、地球シミュレータおよび核融合研のプラズマシミュレータをはじめ

とした並列型スーパーコンピュータを用いて、5次元位相空間を扱う大規模なシミュレーションを高効率に実行することが可能となった。これにより、実空間のみならず速度空間上での微視的な分布関数揺動のレベルからトロイダル・プラズマの乱流輸送を扱うことができる。

## (2) ゴーナルフローの基本特性の研究

乱流輸送抑制の鍵を握る帯状流（ゴーナルフロー）の応答関数について理論解析およびGKVコードを用いたシミュレーション研究を行い、トカマク配位でのゴーナルフローの分布関数構造とイオンの有限軌道幅効果を含んだ測地的音響モード(GAM)振動の無衝突減衰過程を明らかにした。この成果は、ゴーナルフローおよびGAMの基本特性についての標準的な参照例として各国の研究グループから引用されている。

ゴーナルフロー応答の研究をヘリカル型磁場閉じ込め配位へ拡張し、ゴーナルフロー生成に対するヘリカル磁場分布の効果を理論解析およびGKVシミュレーションにより明らかにした。その結果、粒子の2体衝突に起因した新古典輸送が低下する場合に高いゴーナルフロー振幅が保たれるという理論予測を確認した。

## (3) トロイダル・プラズマの乱流輸送のシミュレーション研究

独自に開発したGKVコードを用い、5次元位相空間上の分布関数構造のレベルからトカマク型磁場閉じ込めプラズマの乱流輸送シミュレーションを行うことに世界で初めて成功し、ゴーナルフローを伴った異常熱輸送の統計的な定常状態をエントロピー・バランスとともに確認した。

ヘリカル型磁場閉じ込めプラズマへ拡張したGKVコードを用いた乱流輸送シミュレーションにより、新古典輸送を低下させる磁場配位が、ゴーナルフローの増大効果を介して異常輸送抑制に有効であることを示した。

さらに、上記のシミュレーション研究を大型ヘリカル装置(LHD)実験配位に応用し(図1参照)、未解決であったLHD実験の内寄せ配位における閉じ込め改善に合理的な説明を与えることができた。これにより将来のプラズマ閉じ込め性能向上に有用な理論的指針が確認された。

## (4) ヘリカルプラズマの新古典輸送シミュレーション

LHD プラズマのグローバルな平衡配位と

イオンの有限軌道幅効果を取り入れて新古典輸送を扱うことのできる新しいシミュレーション・コードFORTEC-3Dを用いて、GAM振動のドリフト運動論的シミュレーション解析を行い、振動特性のヘリカル磁場成分への依存性を詳細に解析した。

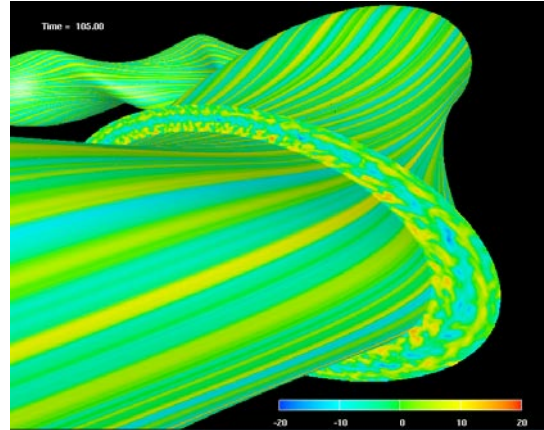


図1 LHD配位でのイオン温度勾配乱流のジャイロ運動論的シミュレーション

## 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18件)

- ① H. Sugama and T.-H. Watanabe, “Turbulence-driven zonal flows in helical systems with radial electric fields”, *Physics of Plasmas* Vol.16, No.5 (2009) pp.056101-1-10.
- ② T.-H. Watanabe, Y. Todo, and W. Horton, “Benchmark Tests of Fusion Plasma Simulation Codes for Studying Microturbulence and Energetic-Particle Dynamics”, *Plasma and Fusion Research* Vol.3 (2008) pp.061-1-6.
- ③ H. Sugama, T.-H. Watanabe, and S. Ferrando-Margalet, “Gyrokinetic Studies of Ion Temperature Gradient Turbulence and Zonal Flows in Helical Systems”, *Plasma Fusion Research*, Vol. 3 (2008) pp.041-1-9.
- ④ T.-H. Watanabe, H. Sugama, and S. Ferrando-Margalet, “Reduction of Turbulent Transport with Zonal Flows Enhanced in Helical Systems”, *Physical Review Letters* Vol.100, (2008) pp.195002-1-4.
- ⑤ S. Ferrando-Margalet, H. Sugama, and T.-H. Watanabe, “Zonal flows and ion temperature gradient instabilities in multiple-helicity magnetic fields”, *Physics of Plasmas* Vol.14, No.12 (2007) pp.122505-1-10.
- ⑥ T.-H. Watanabe, H. Sugama, and S. Ferrando-Margalet, “Gyrokinetic simulation

- of zonal flows and ion temperature gradient turbulence in helical systems”, *Nuclear Fusion* Vol.47, No.9 (2007) pp.1383-1390.
- ⑦ S. Satake, H. Sugama, and T.-H. Watanabe, “Simulation studies on the GAM oscillation and damping in helical configurations”, *Nuclear Fusion*, Vol. 47, No. 9 (2007) pp. 1258-1264.
- ⑧ H. Sugama, T.-H. Watanabe, and W. Horton, “Collisionless kinetic-fluid model of zonal flows in toroidal plasmas”, *Physics of Plasmas* Vol.14, No.2 (2007) pp.022502-1-18.
- ⑨ Y. Idomura, T.-H. Watanabe, and H. Sugama, “Kinetic Simulations of Turbulent Fusion Plasmas”, *Comptes Rendus Physique* Vol.7, (2006) pp.650-669.
- ⑩ H. Sugama and T.-H. Watanabe, “Collisionless Damping of Geodesic Acoustic Modes”, *Journal of Plasma Physics* Vol.72, part 6 (2006) pp.825--828.; Erratum, *ibid.* Vol.74, part 1 (2008) pp.139-140.
- ⑪ H. Sugama and T.-H. Watanabe, “Collisionless damping of zonal flows in helical systems”, *Physics of Plasmas* Vol.13, No.1 (2006) pp.012501-1-18.; Erratum, *ibid.* Vol.14, No.7 (2007) pp.079902-1-2.
- ⑫ H. Sugama, T.-H. Watanabe, S. Ferrando i Margalet, “Gyrokinetic and Gyrofluid Models for Zonal Flow Dynamics in Ion and Electron Temperature Gradient Turbulence”, Joint Varenna-Lausanne International Workshop (28 August-1 September, 2006, Varenna, Italy) in *Theory of Fusion Plasmas* (edited by J. W. Connor, O. Sauter, and E. Sindoni, AIP, 2006), 412-417.
- ⑬ S. Ferrando i Margalet, H. Sugama, T.-H. Watanabe, Y. Yoshimura, C. Suzuki, and A. Shimizu, “Simulations of Zonal Flow Damping and Electron Bernstein Waves in Helical Systems”, Joint Varenna-Lausanne International Workshop (28 August-1 September, 2006, Varenna, Italy) in *Theory of Fusion Plasmas* (edited by J. W. Connor, O. Sauter, and E. Sindoni, AIP, 2006), 330-335.
- ⑭ T.-H. Watanabe, H. Sugama, and S. Ferrando i Margalet, “Gyrokinetic-Vlasov simulations of the ion temperature gradient turbulence in tokamak and helical systems”, Joint Varenna-Lausanne International Workshop (28 August-1 September, 2006, Varenna, Italy) in *Theory of Fusion Plasmas* (edited by J. W. Connor, O. Sauter, and E. Sindoni, AIP, 2006) p264.
- ⑮ T.-H. Watanabe and H. Sugama, “Velocity-space structures of distribution function in toroidal ion temperature gradient turbulence”, *Nuclear Fusion* Vol.46, No.1 (2006) pp.24-32.
- ⑯ 渡邊智彦, 洲鎌英雄, 井戸村泰宏, 講座“微視的乱流シミュレーション 4. 微視的乱流シミュレーションにおける将来に向けての課題”, *プラズマ・核融合学会誌, Journal of Plasma Fusion Research* Vol.81, No.9 (2005), pp.698-702.
- ⑰ 渡邊智彦, 講座“微視的乱流シミュレーション 3. 微視的乱流のVlasovシミュレーション”*プラズマ・核融合学会誌, Journal of Plasma Fusion Research* Vol.81, No.9 (2005) pp.686-697.
- ⑱ 渡邊智彦, 洲鎌英雄, 講座“微視的乱流シミュレーション 1. 微視的乱流シミュレーションとは”*プラズマ・核融合学会誌, Journal of Plasma Fusion Research* Vol.81, No.7 (2005) pp.534-546.
- [学会発表] (計 12 件)
- ① M. Nakata, T.-H. Watanabe, H. Sugama, and W. Horton, “Gyrokinetic analysis of vortex structures and distribution functions in slab ETG turbulence”, 50<sup>th</sup> Annual Meeting of the Division of Plasma Physics of The American Physical Society (17-21 November 2008, Dallas, Texas, USA) TP6.00141.
- ② T.-H. Watanabe, H. Sugama, and S. Ferrando-Margalet, “Regulation of Turbulent Transport in Neoclassically Optimized Helical Configurations with Radial Electric Field”, 22nd IAEA Fusion Energy Conference (13-18 October 2008, Geneva, Swiss Confederation) TH/P8-20.
- ③ H. Sugama and T.-H. Watanabe, “Collisional damping of zonal flows in toroidal plasmas”, 14<sup>th</sup> International Congress on Plasma Physics (8-12 September 2008, Fukuoka, Japan) FB-P1-024.
- ④ T.-H. Watanabe, H. Sugama, and S. Ferrando-Margalet, “Gyrokinetic simulation of turbulent transport reduction and zonal flow enhancement in helical systems”, 14<sup>th</sup> International Congress on Plasma Physics (8-12 September 2008, Fukuoka, Japan) FB-O1-X5.
- ⑤ T.-H. Watanabe, S. Ferrando-Margalet, and H. Sugama, “Effects of multi-helicity confinement fields on zonal flows and ion temperature gradient turbulence”, Joint Conference of 17th International Toki Conference on Physics of Flows and Turbulence in Plasmas and 16th International Stellarator/Heliotron Workshop 2007 (15-19 October 2007, Toki, Japan), P2-061.

- ⑥ H. Sugama, T.-H. Watanabe, and S. Ferrando-Margalet, “Gyrokinetic studies of ion temperature gradient turbulence and zonal flows in helical systems”, Joint Conference of 17th International Toki Conference on Physics of flows and Turbulence in Plasmas and 16th International Stellarator/Heliotron Workshop 2007 (15--19 October 2007, Toki, Japan), I-08.
- ⑦ T.-H. Watanabe and H. Sugama, “Gyrokinetic Theory and Simulation of Zonal Flows and Turbulence in Helical Systems”, 21st IAEA Fusion Energy Conference (16-21 October 2006, Chengdu, China) EX/5-4.
- ⑧ T.-H. Watanabe, H. Sugama, and S. Ferrando i Margalet, “Gyrokinetic-Vlasov simulations of the ion temperature gradient turbulence in tokamak and helical systems”, Joint Varenna-Lausanne International Workshop (28 August-1 September, 2006, Varenna, Italy) in *Theory of Fusion Plasmas* (edited by J. W. Connor, O. Sauter, and E. Sindoni, AIP, 2006) p264.
- ⑨ S. Ferrando i Margalet, H. Sugama, T.-H. Watanabe, Y. Yoshimura, C. Suzuki, and A. Shimizu, “Simulations of Zonal Flow Damping and Electron Bernstein Waves in Helical Systems”, Joint Varenna-Lausanne International Workshop (28 August-1 September, 2006, Varenna, Italy) in *Theory of Fusion Plasmas* (edited by J. W. Connor, O. Sauter, and E. Sindoni, AIP, 2006), 330-335.
- ⑩ H. Sugama, T.-H. Watanabe, S. Ferrando i Margalet, “Gyrokinetic and Gyrofluid Models for Zonal Flow Dynamics in Ion and Electron Temperature Gradient Turbulence”, Joint Varenna-Lausanne International Workshop (28 August-1 September, 2006, Varenna, Italy) in *Theory of Fusion Plasmas* (edited by J. W. Connor, O. Sauter, and E. Sindoni, AIP, 2006), 412-417.
- ⑪ H. Sugama and T.-H. Watanabe, “Collisionless Damping of Geodesic Acoustic Modes”, Joint Conference of 19th International Conference on Numerical Simulation of Plasmas and 7th Asia Pacific Plasma Theory Conference (12-15 July 2005, Nara) A6-2.
- ⑫ T.-H. Watanabe and H. Sugama, “Entropy balance in gyrokinetic-Vlasov simulation of toroidal plasma turbulence”, Joint Conference of 19th International Conference on Numerical Simulation of Plasmas and 7th Asia Pacific Plasma Theory Conference (12-15 July 2005, Nara) P2-52.
- (他に国内学会を中心に 37 件の発表あり)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

渡邊 智彦 (WATANABE TOMO-HIKO)  
核融合科学研究所・シミュレーション科学  
研究部・准教授  
研究者番号：30260053

### (2) 研究分担者

洲鎌 英雄 (SUGAMA HIDEO)  
核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・  
教授  
研究者番号：80202125  
佐竹 真介 (SATAKE SHINSUKE)  
核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・  
助教  
研究者番号：70390630

### (3) 連携研究者

山岸 統 (YAMAGISHI OSAMU)  
核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・  
助教  
研究者番号：20413990  
渡邊 國彦 (WATANABE KUNIHICO)  
海洋研究開発機構・地球シミュレータセン  
ター・プログラムディレクター  
研究者番号：40220876