

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：17102

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2013～2014

課題番号：25887041

研究課題名(和文) 捕捉イオン共鳴駆動型位相空間乱流の理論研究

研究課題名(英文) Theoretical study on trapped ion turbulence with strong resonance

## 研究代表者

小菅 佑輔 (Kosuga, Yusuke)

九州大学・学内共同利用施設等・助教

研究者番号：00700296

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：磁化不均一環状プラズマに生じる捕捉イオン乱流を対象とし、共鳴によって相関した粒子群(グラニュレーション)が生じた場合、i.) 周波数スペクトルの広がりを起こす事、ii.) 粒子の相関が、通常の流体的なExB散乱とシア流れのみならず、歳差運動速度差によって失われて行く事、iii.) 位相空間を介して、磁場に垂直な方向の流れと平行な方向の流れが互いに変換される事、を明らかにした。学会発表や論文執筆を通じて成果を発信した。

研究成果の概要(英文)：We have analyzed trapped ion turbulence with granulations. The results indicate i.) granulations broadens frequency spectrum, ii.) granulations decorrelate due to ExB scattering, flow shearing, and difference in precession speeds, and iii.) granulations can convert poloidal and toroidal flows via phase space. These results were reported in the form of conference talk and journal papers.

研究分野：プラズマ物理

キーワード：プラズマ乱流 位相空間 流れ

## 1. 研究開始当初の背景

実験室プラズマや天体プラズマの振舞の理解を目指した研究を通して、プラズマ乱流研究に大きな進展があった。特に、実空間での非線形性に着目したドリフト波と帯状流の非線形結合などの、詳細なドリフト波乱流の研究が進められた。その一方で、実空間と速度空間を併せた位相空間において、分布関数の統計的成分を含む、「位相空間乱流」が発達することが体系的に論じられた[1]。従来の理論で理解できなかった難問が、位相空間の運動に着目することで解決できるのではないかという機運も高まっている。例えば、入力加熱に対する乱流や輸送の早い応答という驚くべき実験観測[2]に対し、位相空間自由度に由来する駆動力に基づいた理論[3]を応用することで、説明が試みられた。更には、位相空間に形成した渦が、分極電荷を散乱することで、従来のドリフト波乱流による駆動とは別に、帯状流を駆動する新しい力を及ぼすことが理論的に示された[4]。位相空間という広がった視点から問題をとらえることで、プラズマ乱流の統計的成分などに由来する、幅広い動力学や物性の記述が可能となる。こうした状況を踏まえ、位相空間から乱流を考えるアプローチによる理論が、具体的に実験で推進できる状況へと進展すべき段階に来ていた。

## 2. 研究の目的

トロイダルプラズマにおける捕捉イオン共鳴が駆動する位相空間乱流を題材として、位相空間渦の形成や、それが引き起こす不安定性や流れの加速を定式化し、それを通じて、シミュレーションや実験による検定や検証を行うための位相空間プラズマ乱流理論の拡張と整備を行う。

## 3. 研究の方法

位相空間乱流の具体例として、捕捉イオン乱流を扱う。共鳴が強くなった場合、位相空間分布関数の揺動成分の

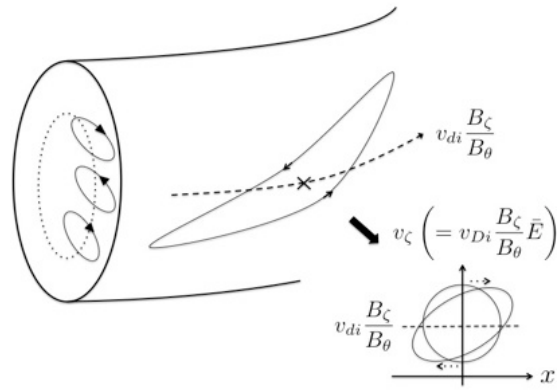


図1：変換過程の概念図

時間発展を位相空間の2点相関関数を用いて定式化する。2点相関関数の時間発展に基づき、位相空間乱流の特徴である速度空間での強い相関や、乱流の周波数スペクトルの広がり、動的摩擦による輸送を評価していく。

## 4. 研究成果

### (1) 変換

共鳴が強い捕捉イオン乱流の輸送理論を、トロイダル運動量輸送の問題に応用した。その結果、ポロイダル流が加速する場合に、捕捉イオンがつくる位相空間構造を介してトロイダル流が加速される機構を見出した[成果論文⑧など]。概念図を図1に示す。また、ここで示されたトロイダル流の加速は、環状プラズマにおける残留応力成分として理解される事が明らかとなった。ここで示した変換過程は、小型から中型の装置の、安全係数が高い領域において強く表れることが予測されている。

### (2) 寿命

トロイダルプラズマにおける輸送が、シア流れによって抑制される機構が理論予測され、実験的にも検証されている。そのような知見は流体モデルに基づいて得られていたが、本研究では共鳴が強く出る運動論的な乱流へと拡張を進めた。その結果、無衝突プラズマ乱流では、相関時間が流体的な非相関時間のみならず、粒子の個々の速度、エネルギーの関数となることを見

出した(成果論文⑦など)。その結果、粒子レベルで定式化された結果から巨視的な性質を導出して行く際には、粒子のエネルギーに関して積分を行う事が必要となる事が明らかとなった。エネルギー積分を行う際には、物理的な考察に基づき積分のカットオフを取り入れる事が必要となる。より詳細な解析については今後進めて行く予定である。

### (3) スペクトルの広がり

共鳴が強くなった場合の乱流の基礎付けを行った。捕捉イオン乱流では、共鳴が強くなり相関した粒子群(グラニュレーション)が生じた場合には、特徴的なスケールとして空間的には乱流の相関長程度、エネルギー空間的には共鳴幅程度の大きさを持つ事が明らかとなった(成果論文③など)。定量的には、グラニュレーションは分布関数の位相空間2点相関関数で特徴付けられる。特に、グラニュレーションが持つ特徴的なスケールにおいて、準線形理論では再現できない強い相関を持つ事がわかった。巨視的な物理量への影響としては、共鳴粒子の塊としてのグラニュレーションがプラズマの中を動き、チェレンコフ放射を行う事で、分散関係を満たさない揺動成分が生み出される。その結果周波数スペクトルに広がりが起こる事が明らかとなった。

### 参考文献：

- [1] P.H. Diamond, et al: *Physical Kinetics of Turbulent Plasmas, (Modern Plasma Physics Vol.1)*, (Cambridge University Press, Cambridge, 2010)
- [2] S. Inagaki, et al.:24<sup>th</sup> IAEA Fusion Energy Conf., San Diego, 2012, EX/10-1
- [3] S.-I. Sanae and K. Itoh:24<sup>th</sup> IAEA Fusion Energy Conf., San Diego, 2012, PD/P8-11
- [4] Y.Kosuga, et al.: Phys. Plasmas **18** 122305 (2011)

### 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. Kosuga, S.-I. Itoh, and K. Itoh: ‘Density peaking by parallel flow shear driven instability’ Plasma Fusion Res. **10** 3401024 (2015) DOI: 10.1585/pfr.10.3401024
- ② M. Lesur, P.H. Diamond, Y. Kosuga: ‘Phase-space jets drive transport and anomalous resistivity’ Phys. Plasmas **21** 112307 (2014) DOI:10.1063/1.4902525
- ③ Y. Kosuga, S.-I. Itoh, P.H. Diamond, K. Itoh, and M. Lesur: ‘Ion temperature gradient driven Turbulence with strong trapped ion resonance’ Phys. Plasmas **21** 102303 (2014) DOI: 10.1063/1.4897179
- ④ Y. Kosuga and M. Lesur: ‘Development of plasma turbulence research into phase space’ J. Plasma Fusion Res. **90** 289 (2014) [http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF\\_JSPF/jspf2014\\_05/jspf2014\\_05-289.pdf](http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF_JSPF/jspf2014_05/jspf2014_05-289.pdf)
- ⑤ M. Lesur, P.H. Diamond, and Y. Kosuga: ‘Nonlinear current-driven ion-acoustic instability driven by phase-space structure’ Plasma Phys. Control. Fusion **56** (2014) 075005 DOI: 10.1088/0741-3335/56/7/075005
- ⑥ Y. Kosuga, P.H. Diamond, G. Dif-Pradalier, and O.D. Gurcan: ‘ExB shear pattern formation by radial propagation of heat flux waves’ Phys. Plasmas **21** (2014) 055701 DOI: 10.1063/1.4872018
- ⑦ Y. Kosuga, S.-I. Itoh, P.H. Diamond, K. Itoh, and M. Lesur: ‘Relative dispersion of trapped ion granulations in sheared flows’ Plasma Fusion Res. **9** (2014) 3403018 DOI:10.1585/pfr.9.3403018

- ⑧ Y. Kosuga, S.-I. Itoh, P.H. Diamond, and K. Itoh: ‘Conversion of poloidal flows into toroidal flows by phase space structures in trapped ion resonance driven turbulence’ *Plasma Phys. Control. Fusion* **55** (2013) 125001  
DOI:10.1088/0741-3335/55/12/125001

[学会発表] (計 13 件)

- ① 小菅佑輔 ‘捕捉イオン乱流の非相関過程’ 日本物理学会第 70 回年次大会 2015/3/21 早稲田大学(東京)
- ② 小菅佑輔 ‘Density Peaking by Parallel Flow Shear Driven Instability’ 第 12 回核燃焼プラズマ統合コード研究会 2012/12/12 九州大学 (春日)
- ③ 小菅佑輔 ‘非平衡極限-平行速度シアが駆動する密度分布構造形成-’ *Plasma Conference 2014* 2014/11/21 朱鷺メッセ (新潟)
- ④ Y. Kosuga, ‘Density Peaking by Parallel Flow Shear Driven Instability’ 24<sup>th</sup> International Toki Conference on Expanding Horizons of Plasma and Fusion Science through Cross-Fertilization, Nov. 7<sup>th</sup> (2014) Toki (Japan)
- ⑤ Y. Kosuga, ‘Progress on Transport Modeling by Trapped Ion Resonance Driven Turbulence’ 25<sup>th</sup> IAEA Fusion Energy Conference, Oct. 14<sup>th</sup> 2014 St. Petersburg (Russia)
- ⑥ Y. Kosuga, ‘Summary of Young Researcher Forum’ The 4th Asia Pacific Transport Working Group International Conference, , June 13, 2014, Kyushu (Japan)
- ⑦ Y. Kosuga, ‘Transport Reduction in Ion Temperature Gradient Driven Turbulence with Strong Precession

Resonance’ The 4th Asia Pacific Transport Working Group International Conference, , June 11, 2014, Kyushu (Japan)

- ⑧ 小菅佑輔 ‘シア流れと速度空間自由度を含んだプラズマ乱流による混合過程’ 日本物理学会第 69 回年次大会 2014 3/27 東海大学 (平塚)
- ⑨ 小菅佑輔 ‘Modeling of turbulence in the edge-core coupling region in tokamak plasmas’ 第 11 回核燃焼プラズマ統合コード研究会 2013/12/19 九州大学 (春日)
- ⑩ Y. Kosuga, ‘How the Propagation of Heat-Flux Modulations Triggers ExB Flow Pattern Formation’ 55<sup>th</sup> Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, 11/12/2013 Denver (USA)
- ⑪ Y. Kosuga ‘Toroidal momentum transport by trapped ion resonance driven ion temperature gradient driven turbulence’ 14<sup>th</sup> International Workshop on H-mode Physics and Transport Barriers 10/2/2013 Kyushu (Kasuga)
- ⑫ 小菅佑輔 ‘熱アバランチの渋滞による ExB 流れの構造形成’ 日本物理学会秋季大会 2013/9/25 徳島大学 (徳島)
- ⑬ Y. Kosuga, ‘On how the radial propagation of heat flux modulations triggers ExB flow pattern formation’ 7<sup>th</sup> Festival de Theorie, July/9/2013 Aix-en-Provence (France)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小菅 佑輔 (Kosuga, Yusuke)  
九州大学・高等研究院・助教  
研究者番号 : 00700296