

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17799

研究課題名(和文)運動論的效果を含むプラズマ乱流混合過程の相図

研究課題名(英文)Mixing process by turbulent plasmas including kinetic effects

研究代表者

小菅 佑輔 (Kosuga, Yusuke)

九州大学・応用力学研究所・准教授

研究者番号：00700296

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、波数空間、実空間、速度空間における乱流の混合過程に着目し、流れを生み出す効果や2次的に生じた流れによるフィードバック機構の理解、実空間での輸送、特に非局所輸送への効果を調査することを目標とする。特に、速度空間を含めた乱流研究では、数値実験や物理実験での検証を念頭においたモデル導出を行い、速度空間自由度の効果を検討するための有用な指針を得ることを目標とする。本研究では特に非局所的な混合過程との関係について着目する。

研究成果の概要(英文)：The goal of this research is to develop our understanding of mixing process by turbulent plasmas in wave number, real, and velocity space. In particular, we focus on the role of secondary flows and their feedback on the underlying turbulence, and impact on non-local transport processes. When developing models for mixing with the degree of freedom in velocity space, impact on real space phenomena is emphasized. Numerical and physical experiments are proposed to test predictions from the theory of phase space turbulence.

研究分野：プラズマ物理

キーワード：プラズマ乱流 混合 輸送 流れ

### 1. 研究開始当初の背景

自然界や実験室のプラズマの振る舞いの理解のためには乱流の励起やそれによる輸送の理解が必要不可欠である。核融合プラズマでは、入力加熱の増加に伴う閉じ込め性能劣化が報告され、その原因として乱流による輸送が指摘されていたが、実験的に報告されている経験則は未だ満足のいく説明はされていない[1]。先行研究での報告以来、30年来の未解決問題として残されている。この問題にアプローチするためには、やはり乱流の非線形ダイナミクスの詳細な理解が必要となる。単純な乱流輸送モデルでは、輸送束を拡散の形でモデル化し、輸送係数を混合長理論程度の大きさで評価したモデルが用いられる。しかしながら、水素同位体効果などの定性的な振る舞いが一致せず、輸送モデルの拡張が必要となる。その方策として、アバランチや乱流の空間的拡がりなどの影響が論じられ、研究が展開してきた。第一原理シミュレーション研究の進展により実験結果との定量的な比較が始められつつある[2]。これらの研究は主に実空間でのプラズマの振る舞いに着目している一方で、プラズマ乱流は速度空間の自由度も重要となる。速度空間の自由度を含めた乱流理論は古くは Dupree[3] や Kadomtsev[4] らによって展開されてきたが、その後の実空間の多スケール間結合などの重要な研究の影に隠れ、まだ十分に開拓されていない未開の荒野である。包括的な乱流像や輸送モデルの構築には、実空間、速度空間の双方から研究を展開していくことが重要となる。

### 2. 研究の目的

本研究では、波数空間、実空間、速度空間における乱流の混合過程に着目し、流れを生み出す効果や2次的に生じた流れによるフィードバック機構の理解、実空間での輸送、特に非局所輸送への効果を調査することを目標とする。特に、速度空間を含めた乱流研究では、数値実験や物理実験での検証を念頭においたモデル導出を行い、速度空間自由度の効果を検討するための有用な指針を得ることを目標とする。本研究では特に非局所的な混合過程との関係について着目する。

### 3. 研究の方法

簡約化されたプラズマを対象とし、理論モデルを用いた解析を進める。図1に示されたような長軸方向に磁化された柱状プラズマを対象とし、不均一な密度や渦度、平行流の時間発展をモデル化する。密度と渦度のみを解析する流体モデルや、平行流を含めた3場の流体モデル、磁場方向の粒子の運動を考慮したドリフト運動論モデルを目的に応じて使い分ける。

### 4. 研究成果

#### (1) 速度空間自由度を含めた乱流混合と非局

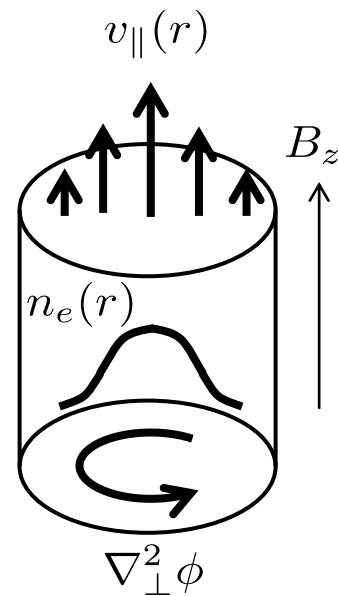


図1 簡約された柱状プラズマ (論文業績4)

#### 所輸送

プラズマ乱流研究は二つの軸を通して発展してきた。すなわち、通常の流体乱流との類似性(準2次元性、逆カスケード、流れとの結合)に着目した研究と、プラズマ乱流特有の自由度である速度空間に着目した研究である。後者の効果を含めることで、亜臨界不安定性や動的摩擦による空間輸送が生じることが論じられてきた。本研究では、速度空間を含めた位相空間において混合が生じた結果、実空間において弾道的な変位が生じ、これにより帯状流や非局所輸送が生じることを理論的に議論した。数値実験で検証を進める第一候補として、無衝突捕捉電子モード(Collisionless Trapped Electron, CTEM)乱流の重要性について指摘した。物理実験としては、流れとの結合に着目し、流れの変化に呼応した分布関数の変動をレーザー励起蛍光法にて計測する方法について報告している。

#### (2) 非局所輸送と平行流れの駆動

プラズマの輸送に対して非局所輸送の重要性が指摘されていたが、主な対象としては電子やイオンの熱輸送への効果が検討されてきた。その一方で、炉心の平行流れが周辺プラズマでの流れの方向などに応答することが報告されており、平行運動量輸送のチャンネルにおいても非局所輸送が発現する可能性がある。本研究では、乱流による平行運動量の非局所応答に対する理論を構築した(図3)。通常乱流の径方向への拡がりエネルギーに着目した解析が行われるが、平行方向への対称性が破れている場合、乱流自身が有限な平行運動量密度を持つ。周辺プラズマにおいては、平均流やそれが生み出す電場によって乱流揺

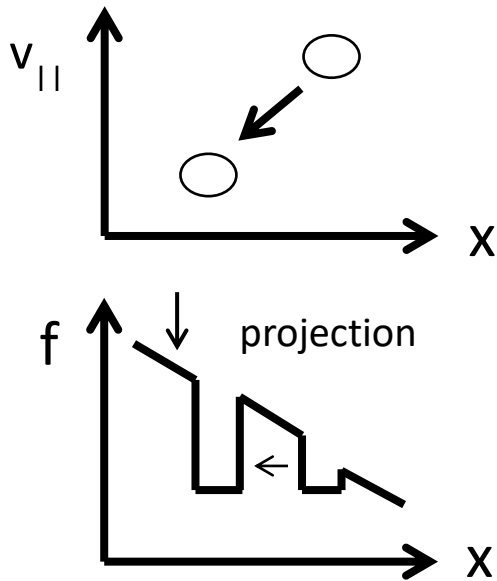


図2 位相空間における混合と非局所輸送に関する模式図 (論文業績3)

動の対称性が破られる可能性が高い。この対称性が破れた乱流が炉心へと伝わると、有限な乱流の運動量が炉心プラズマの平均流れへと変換される。これらのプロセスを定式化し、乱流の運動量が伝搬する過程に拡散のプロセスと対流的プロセスがあることを見出した。双方のプロセスとも、乱流が強いところから弱いところへと拡がる効果を生み出す。このプロセスが、実験的に報告されている周辺プラズマの流れの反転と炉心プラズマにおける流れの応答に対して鍵となることを論じた。実験検証法として、動的な周辺プラズマの摂動と炉心流れの応答時間に着目する方法を提唱した。

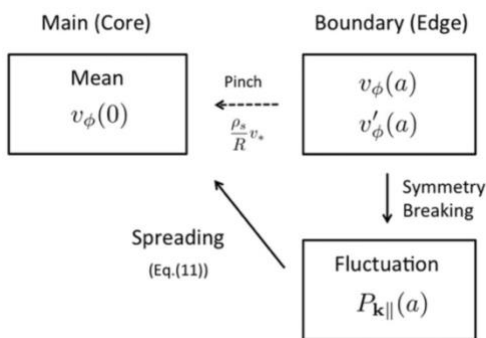


図3 周辺揺動の伝搬と炉心流れの応答についての概念図 (論文業績5)

(3) 平行流が駆動する乱流の非線形発展

核融合などのプラズマでは通常スカラー勾配、例えば圧力勾配や密度勾配などが駆動するドリフト波が解析の対象となる。その一方

で、自然界のプラズマや核融合プラズマでも輸送障壁などの領域では速度シアが強くなり、ベクトル場勾配が駆動する乱流が発達する。磁場に平行なシア流れが駆動する不安定性 (Parallel Velocity Gradient, PVG) は古くから知られていたが、その非線形発展は未開拓であった。本研究では、この PVG 乱流の非線形発展に対して、波数空間のエネルギー混合に着目し、PVG 乱流から2次的な帯状流が生成される過程を定式化した。PVG 乱流のエネルギーの時間発展を波数空間でモデル化し、クロージャーを行うことで、帯状流へ流れ込むエネルギーの時間発展を解析した。これにより、PVG 乱流における帯状流の非線形成長率を評価し、PVG 不安定性の成長率と同程度となり、帯状流の生成が PVG 乱流の時間発展に対して無視できないことを示した。また、帯状流の非線形発展の結果、磁場方向の流れと合わせることで、最終的に螺旋的な流れが生じることを理論的に予測している (図2)。自然界に普遍的に見られる螺旋流の起原として平行流れ駆動乱流の重要性について指摘した。このプロセスをその後流体型コードに基づく非線形シミュレーションにおいても確認された。

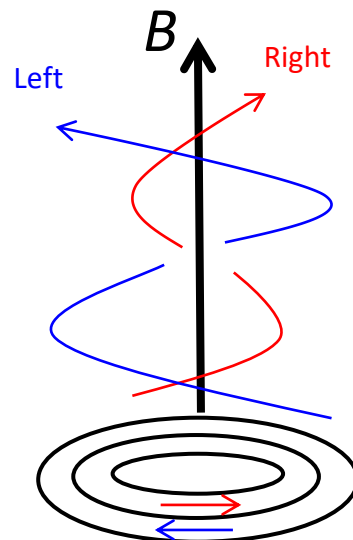


図4 螺旋流の非線形発展 (論文業績4)

(4) 波数空間混合の平行流への依存性

磁場方向の流れは中性粒子ビーム入射などの外部的な方法や乱流自身により内部的に生成される場合がある。いずれの場合においても、一旦生じれば、シアなどの効果により背景乱流へフィードバックする。本研究では、この平行流れシアが、波数空間のエネルギー移送をコントロールする重要なパラメータとなることを見出した。(図5) ここで、1次に生じる乱流としてドリフト波を想定し、日

線型結合によりエネルギーが波数空間で帯状流や径方向に伸びたストリーマーなどへと溜まる。その結果帯状流やストリーマーが非線形的に成長するが、この成長過程が平行流れシアに敏感であることがわかった。すなわち、平行流れシアが弱い場合には帯状流が選択的に励起されるが、平行流れシアが強くなると、ストリーマーが好まれる状態になることが示唆された。数値実験でも同様の傾向が確認され、バイコヒーレンス解析により実験データから検証することも可能である。この成果を発展させれば、2次的なパターン形成の選択を波数空間でのエネルギー混合に着目して分類できるのではないかとこの着想を得た。今後の展開が期待される。

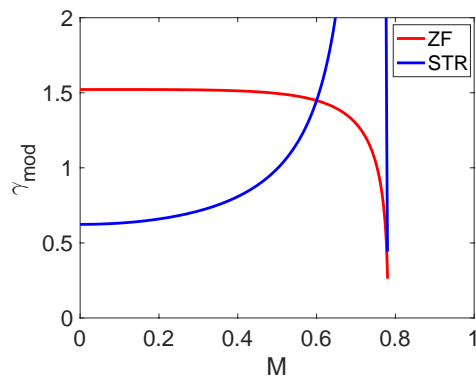


図5 2次的流れの非線形成長率の平行流れシアへの依存性 (論文業績6)

#### 参考文献

- [1] M. Shimada, et al., Nucl. Fusion **47** S1 (2007)
- [2] K. Ida, et al., Nucl. Fusion **55** 013022 (2015)
- [3] T.H. Dupree, Phys. Fluids **15** 334 (1972)
- [4] B. Kadomtsev and O.P. Pogutse, Phys. Rev. Lett. **25** 1155 (1970)

#### 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6件、すべて査読あり)

1. Y. Kosuga: 'How pattern is selected in drift wave turbulence: Role of parallel flow shear' Phys. Plasmas **24** 122305-1-8 (2017) doi: 10.1063/1.5001857
2. Y. Kosuga, S.-I. Itoh, P.H. Diamond, and K. Itoh: 'How turbulence fronts induce plasma spin-up' Phys. Rev. E **95** 031203(R)-1-5 (2017) doi: 10.1103/PhysRevE.95.031203

3. Y. Kosuga, S.-I. Itoh, and K. Itoh: 'Zonal flow generation in parallel flow shear driven turbulence' Phys. Plasmas **24** 032304-1-7 (2017) doi: 10.1063/1.4978485
4. Y. Kosuga, S.-I. Itoh, P.H. Diamond, K. Itoh, and M. Lesur: 'Role of phase space structures in collisionless drift wave turbulence and impact on transport modeling' Nucl. Fusion **57** 072006-1-11 (2017) doi: 10.1088/1741-4326/57/7/072006
5. Y. Kosuga, S.-I. Itoh, and K. Itoh: 'Turbulence dynamics with the coupling of density gradient and parallel velocity gradient in the edge plasmas' Contrib. Plasma Phys. **56** 511-1-5 (2016) doi: 10.1002/ctpp.201610047
6. Y. Kosuga, S.-I. Itoh, and K. Itoh: 'Flux of parallel flow momentum by parallel shear flow driven instability' Plasma Fusion Res. **11** 1203018-1-3 (2016) doi:10.1585/pfr.11.1203018

[学会発表] (計7件)

1. 9<sup>th</sup> Festival de Theorie, Aix-en-Provence, France July 11 2017, Oral, Y. Kosuga 'How parallel shear flow impacts pattern selection in drift wave turbulence' (*invited*)
2. 7<sup>th</sup> Asia Pacific Transport Working Group International Conference, Nagoya, Japan, June 5-8, 2017, poster, Y. Kosuga, 'How turbulence fronts induce plasma spin-up'
3. 26<sup>th</sup> IAEA Fusion Energy Conference, Kyoto, Japan, Oct. 17-22, 2016, poster Y. Kosuga, et al., 'Transport of parallel momentum by the triplet correlation in drift wave turbulence'
4. 18<sup>th</sup> International Congress on Plasma Physics (ICPP), Kaohsiung, Taiwan, June 27 - July 1st, 2016 Y. Kosuga, 'Role of granulations in phase space turbulence' (*invited*)

5. 15<sup>th</sup> International Workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices, Nara, Japan, Sep. 9-11, Poster Y. Kosuga, et al., ‘Turbulence Dynamics with the coupling of density gradient and parallel velocity gradient in the edge plasma’
6. 8<sup>th</sup> Festival de Theorie, Aix-en-Provence, France July 8 2015, Oral, Y. Kosuga ‘Inward particle flux driven by parallel flow shear driven instability’ (*invited*)
7. The 5<sup>th</sup> Asia Pacific Transport Working Group International Conference, Dalian, China, May 9-12, 2015, oral, Y. Kosuga, et al., ‘Inward particle flux driven by parallel flow shear driven instability’

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

小菅 佑輔 (KOSUGA, Yusuke)

九州大学・応用力学研究所・准教授

研究者番号：00700296