

令和 4 年 5 月 2 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03578

研究課題名（和文）磁力線方向流れを伴うプラズマ乱流におけるパターン形成

研究課題名（英文）Pattern formation in plasma turbulence with flows along magnetic field

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） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、乱流プラズマに励起される様々な構造の形成について理解を深め、特に磁力線に沿った流れ場の役割に着目した解析を進めることを目的としている。垂直方向の流れの励起の制御に対して、平行流が有効であることを確認し、単色波の場合に得られた成果を複数の波数と周波数を持つ波からなる波動乱流の場合に研究を拡張した。乱流から三次元的螺旋流が励起されることを示し、その定量化を進めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により乱流プラズマに励起される非線形構造の理解が進んだ。様々な物性をもたらす非線形構造の選択的な励起の問題に取り組み、文脈に応じて輸送を改善もしくは劣化させることが可能となることを示した。核融合プラズマへの応用に着手し、核融合プラズマの性能向上に対して、時には輸送を劣化させるようなことが有効であることをモデルにより示すことができた。

研究成果の概要（英文）：The aim of this study is to elucidate the role of flows along the magnetic field in exciting various secondary structures in plasmas. The previous research reports the modulational instability of perpendicular flows can be controlled by the parallel flows. This study has been extended to the case of spectrum waves, where density modulation has been found to be relevant to excite radial streamer flows. 3D helical flow structures are also excited in turbulent plasmas and the flow helicity can be used to quantify its excitation.

研究分野：プラズマ科学

キーワード：プラズマ乱流 非線形パターン

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

乱流プラズマでは様々な非線形構造が励起され系の振る舞いを規定する。天体では乱流プラズマは磁場を生み出し、実験室プラズマでは磁化プラズマにおける帯状流やストリーマーなどの非線形構造が励起され輸送に影響を与える。様々な構造が励起されることが報告されており、これらの構造は輸送に対する影響も異なる。例えば帯状流は輸送を抑制する一方で、ストリーマーは輸送を促進する。核融合プラズマの閉じ込め性能向上を念頭におけば、異なる物性をもたらす非線形構造を、選択的に励起する方法が必要となる。そのためには、乱流プラズマが生み出す非線形構造の励起の背後にある物理に対する理解を深める必要があり、様々な非線形構造の励起を司る、実験制御可能なパラメータを探ることが重要となる。

磁化プラズマを考えると、空間3次元を、便宜上磁場に垂直な方向の2次元と磁力線に沿った方向の1次元に分解することができる。上述の帯状流やストリーマーといった構造は磁場に垂直な方向の流れの代表例であり、より性格に記述すると帯状流は周方向の流れ、ストリーマーは径方向の流れとなる。磁化プラズマではこれらの磁場に垂直な方向の流れに加え、磁場方向の流れ場が存在し、これらの3次元流れ場構造の間の相互作用等を含めた定式化も重要となる。

実際に代表者が行った研究では、単色波の非線形解析から、磁場方向流れ場をパラメータとして、磁場に垂直な方向の流れ場の励起を制御できる可能性を理論的に指摘した。その一方で、実際にプラズマでは様々な波数や振動数を持つ波が励起される。そのため、先行研究を単色波の場合から互いに非線形相互作用する波動乱流の場合へと拡張することが求められていた。

2. 研究の目的

以上のような背景のもと、本研究では、乱流プラズマが生み出す非線形構造の励起過程に焦点をあて、それらの背景にある物理機構について特に磁力線方向の流れ場が果たす役割を理論的に明らかにすることを目的とする。その場合に、複数の波が存在する場合を念頭においたモデリングを進め、乱流プラズマに励起される非線形構造の励起過程の定式化を進める。様々な非線形構造が励起される中で、励起を司るキーパラメータを同定することを目指す。また、得られた知見の応用として、本研究では核融合プラズマの応用にも取り組むことを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では非線形構造の解析について理論モデリングを進め、複数の波数と周波数を持つ乱流状態のプラズマにおける非線形構造の解析を進める。波動運動論的方程式や選択的減衰などの手法を取り入れ、最終的に励起される非線形構造の分類を進める。理論モデリングを進める一方で、得られて知見に基づき数値計算等で得られて乱流データの解析も適宜必要に応じて進める。

4. 研究成果

(1) 密度変調

本研究課題では、まず単色波の場合に進めた研究(Y. Kosuga, Phys Plasmas 24 122305 2017)に立脚し、複数波動が相互作用する場合の解析を進めた。通常、波動乱流の取り扱いには波動運動論的な記述が用いられる。帯状流の場合への応用が知られており、これを応用することで径方向流れであるストリーマの場合へと適用する先行研究もある。その一方で、これらのストリーマとドリフト波乱流との相互作用に関する表式において、単色の波となる極限を考えても、単色波の結果が再現されないという問題があった。そこで本研究では、波動運動論的方程式の導出をもう一度吟味し、径方向の輸送を生み出すストリーマの場合には、密度変調を伴い、この密度変調がその励起に本質的であることを見出した[1]。密度変調により背景波動の振動数が変調される。その結果波数が変調され有限のレイノルズ応力を生み出すことがわかった。このメカニズムは、従来のシア流による変調とは独立に働き、この密度変調の効果が卓越する場合には非線形構造の励起の様相が質的に異なる。すなわち、通常の流れシアのフィードバックでは非線形構造が振動することなく成長するのに対し、密度変調が支配的になる場合には成長に伴い振動する効果が加わる。その結果背景流は伝搬を伴いながら成長することがわかった。この時の伝播方向は背景乱流とは逆方向となっており、実験結果と定性的に一致することがわかった。新たな成長過程を加えたより正確なストリーマの励起条件を用い、ストリーマと帯状流の励起のしやすさを比較すると、典型的な揺動のパラメータに対し、

ストリーマーの励起が卓越することが可能であることが明らかとなった。

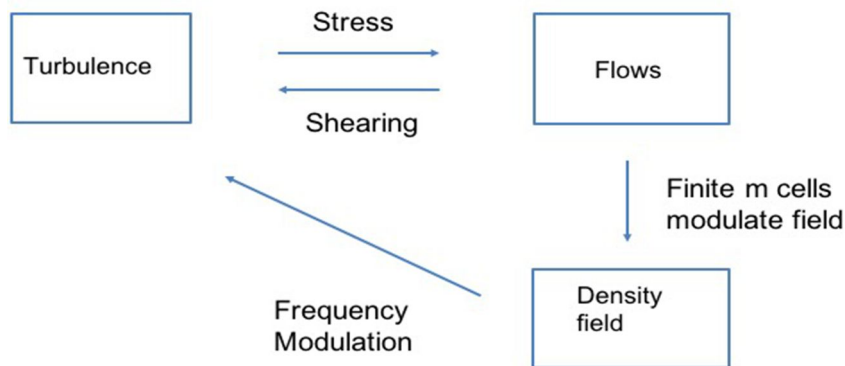


図 1 : 乱流からの流れの励起過程。流れシアからのフィードバックに加え、密度変調が流れの励起に重要となる。[1]より引用。

(2) 最小エンストロフィー流、中性粒子の役割

磁化プラズマに励起される乱流の特徴として、準 2 次元性がある。このときエネルギーと共にエンストロフィー、2 乗平均過度が保存される。これらの量の散逸の違いに着目すると、複数の保存量がある中での緩和を定式化することができる。すなわちエネルギーが大きなスケールに逆カスケードする一方で、エンストロフィーは散逸スケールに向かって順カスケードする。そのためエネルギーが保存される一方でエンストロフィーが最小化される状態が実現されうる。本研究では、このシナリオが、プラズマと中性粒子が共存するような場合においても有効なことを示した[2]。イオンと中性粒子が荷電交換により運動量を交換するため、中性粒子にかかる力をイオンが実行的に感じる。そのため、中性粒子の圧力によりイオンの流れが励起されうる。この時のイオンの流れは、通常の場合によるドリフトに加え、中性粒子圧力勾配によるドリフト効果が加わる。これらの流れ場が過度場を構成するが、この場合においても、プラズマ乱流が持つ 2 次元の性質が保たれることがわかった。この性質に着目し、最終的に選ばれる速度分布構造を、最小エンストロフィー状態として特徴づけた。より一般的には、定常状態は一般化過度（電場および中性圧力勾配から生まれるイオンのドリフト、プラズマの密度勾配に起因するドリフト、両者を含む過度場）がこれ以上混合されない状態、すなわち一般化過度が静電ポテンシャルの任意の関数となる状態として表されるが、最小エンストロフィー状態ではこの関数形が一次関数となる。この場合のイオンの速度場を再構成することで、イオン流の径方向分布を求め、イオン流が持つ典型的なスケールを予測した。惑星乱流で報告されている Rhines Scale と同様のスケールが現れ、このスケールが中性粒子ガス圧に依存する。イオン流の構造が中性粒子分布に応じて変化することを予測した（図 2）。

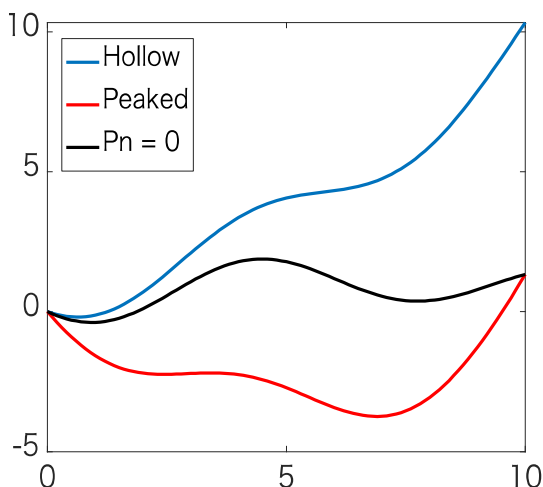


図 2 : イオン流（径方向電場）の中性粒子分布依存性。中性粒子が中心部に溜まる場合（赤）と枯渇する場合（青）において電場構造に違いが見られる。

(3) 螺旋流の形成とヘリシティに基づく解析

磁化プラズマでは、上述のような磁場に垂直方向な流れに加え、磁力線に沿った方向の

流れが重要となる。この場合に3次元な構造を有する螺旋流が励起される[3]。この螺旋流の存在を、理論に基づき予測し(Y. Kosuga, Phys. Plasmas **24** 032304 (2017))、実際の数値実験で再現されることがわかった(M. Sasaki, ... Y. Kosuga, et al., Phys. Plasmas **24** 112103 (2017))。これらの螺旋流の実験定量化を進めることを念頭に置き、本研究では3次元螺旋流の流れヘリシティに基づく定量化を進めた[4]。磁力線方向の速度場が乱流を駆動する場合、磁場方向の対称性が破れ、揺動の持つ流れヘリシティが有限となる(図3)。この時、揺動の持つ流れヘリシティの間に等分配即ち成り立ち、通常3次元流れベクトル場と3次元渦度ベクトル場の揺動計測が必要となる流れヘリシティの計測が簡約化され、磁場方向流れ揺動と渦度揺動から近似的に表現されることを示した。流れヘリシティを用いれば、プラズマの持つ対称性の破れや螺旋流の存在を実験定量的に検証することができることがわかった。

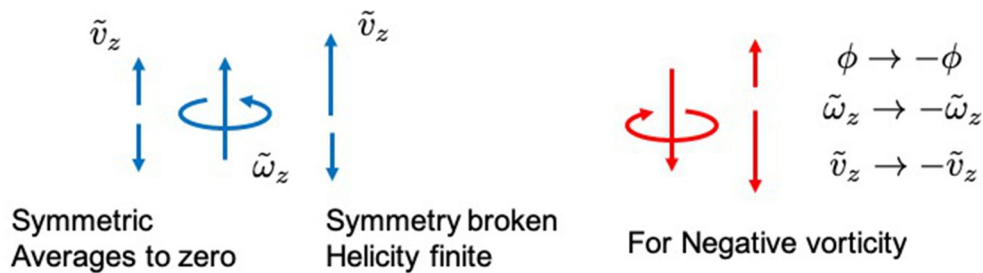


図3：磁場方向の対称性の破れと流れヘリシティの関係。[4]より引用

(4) 核融合応用：

磁化プラズマに非線形的に励起される非線形構造の応用として、核融合周辺領域の熱負荷問題に取り組んだ[4]。周辺領域の乱流輸送が増大すると、核融合スクレイプオフ層の幅が増大することが報告されていた。その一方で、本研究成果で報告した非線形構造の効果を含む研究は限定されていた。そこで、本研究課題で得られた成果を応用し、ストリーマの励起がスクレイプオフ層の幅に及ぼす影響を調査した。ストリーマの効果に着目するため、ドリフト波を典型的な1次乱流と仮定し、解析を進めた。ストリーマが励起された場合のスクレイプオフ層の幅を評価し、ドリフト波が輸送を運ぶと仮定した場合からの増加分を評価した。典型的なプラズマパラメータへの依存性を解析し、定性的に実験的に報告されているスケーリングと一致することがわかった。

以上の成果について、国内の主要学会(日本物理学会、プラズマ核融合学会)や国際学会(17th International Workshop on Plasma Edge Theory等)にて報告し、最終的に5編の学術論文[1-5]を執筆した。

参考文献

- [1] Y. Kosuga and K. Hasamada, Phys. Plasmas **25** 100701 (2018)
 - [2] Y. Kosuga and D. Aoki, Plasma Phys. Control. Fusion **62** (2020) 105002
 - [3] Y. Kosuga, AIP Conf. Proc. 1993 020009 (2018)
 - [4] Y. Kosuga, M. Sasaki, Z.B. Guo, Phys. Plasmas **27** 022303 (2020)
 - [5] Y. Kosuga, F. Kin, M. Sasaki, Contrib. Plasma Phys. (2020) e201900141
- (ここでは成果論文を参考文献に挙げている。より詳しくはこれらの中に含まれている reference を参照されたい。)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kosuga Y., Aoki D	4. 巻 62
2. 論文標題 Minimum enstrophy flows in drift wave turbulence with neutral particles	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 105002 ~ 105002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6587/aba73d	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kosuga Y., Sasaki M., Guo Z. B.	4. 巻 27
2. 論文標題 Flow helicity of wavy plasma turbulence	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 022303 ~ 022303
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5121351	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Kosuga Y., Kin F., Sasaki M.	4. 巻 -
2. 論文標題 Scrape-off layer width set by non-linear streamer flows in drift wave turbulence	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Contributions to Plasma Physics	6. 最初と最後の頁 e201900141
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ctpp.201900141	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kosuga Y., Hasamada K.	4. 巻 25
2. 論文標題 Role of density modulation in driving nonlinear streamer flows in drift wave turbulence	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 100701 ~ 100701
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5049726	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kosuga Y.	4. 巻 1993
2. 論文標題 Helical flow structures in torus plasmas	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 020009-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5048719	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 小菅佑輔、青木大輔
2. 発表標題 中性粒子・乱流プラズマ結合系における流れ分布形成過程
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小菅佑輔、青木大輔
2. 発表標題 中性粒子を含むドリフト波乱流における最小エンストロフィー流
3. 学会等名 プラズマ核融合学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Kosuga, F. Kin, M. Sasaki
2. 発表標題 Selectively exciting nonlinear streamer flows in drift wave turbulence
3. 学会等名 17th International Workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Kosuga
2. 発表標題 Flow helicity: could it be useful for fusion?
3. 学会等名 The 10th Festival de Theorie (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Kosuga and K. Hasamada
2. 発表標題 Revisiting the excitation of radially elongated convective cells in drift wave turbulence
3. 学会等名 19th International Congress on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Kosuga
2. 発表標題 How pattern is selected in drift wave turbulence: role of parallel flow shear
3. 学会等名 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Kosuga, M. Sasaki, Z.B. Guo
2. 発表標題 Generation of helical flow structure in turbulent plasmas and its helicity
3. 学会等名 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------