

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 9 月 26 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24740372

研究課題名(和文)高エネルギー粒子の運動論効果による粒子加熱と帯状流乱流輸送特性の研究

研究課題名(英文) Heating effect by energetic particles and transport properties of turbulence with zonal flows

研究代表者

佐々木 真 (Sasaki, Makoto)

九州大学・応用力学研究所・助教

研究者番号：70575919

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)：プラズマ乱流輸送特性の理解向上を目指し、「高エネルギー粒子効果」及び「乱流構造形成の競合」に着目した研究を行った。高エネルギー粒子が駆動する帯状流の振動ブランチ(GAM)の運動論的解析を行い、イオン加熱効果を議論した。その上で、非線形理論に展開する事でGAMと乱流の結合を取り込んだ飽和過程や伝播則を得る事に成功した。さらに、帯状流を含む複数乱流構造を考慮した乱流輸送の理解を目指し、乱流シミュレーションを行い、複数乱流構造間の選択則及び構造間競合に伴う輸送特性の変化を得た。また、ドリフト波乱流が形成する急峻波面構造の形成機構を理論的に明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Toward the improvement of understanding of plasma turbulent transport properties, we investigate the ``effect of energetic particles`` and ``competition among turbulent structures``. In the turbulent structures, there are zonal flows, which suppress the transport, and several structures which enhance the transport. First, we focus on energetic driven geodesic acoustic mode (GAM), which is an oscillatory branch of the zonal flows. The ion heating effect of the GAMs is discussed. By considering the nonlinear fluid effects, the saturated amplitude and the nonlinear propagation velocity of the GAMs are theoretically obtained. Second, the turbulent transport, which includes the nonlinear competition among several turbulent structures, is investigated by using turbulence simulation. A formation mechanism of the steep wave front by drift waves is theoretically understood. A selection rule of the several turbulent structures, and the change of the transport property are obtained.

研究分野：プラズマ物理学

キーワード：帯状流 測地線音波 GAM 高エネルギー粒子 乱流輸送 ドリフト波

1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込めプラズマにおいて、High confinement mode (H mode)などの閉じ込め効率のよいプラズマを実現するためには、中性粒子ビーム入射 (NBI) などの高エネルギー粒子によるプラズマ加熱が重要である。しかし、輸送理論において、高エネルギー粒子の背景プラズマへの効果は、クーロン衝突によるプラズマ加熱以外は考慮されていないため、NBI などによるプラズマ密度、温度分布の制御性が明らかではない。近年、高エネルギー粒子が持つ背景プラズマへの効果が明らかになりつつある。高エネルギー粒子は振動帯状流 (GAM) を駆動し、GAM のランダウ減衰により間接的にイオン加熱に寄与する可能性が準線形理論の枠組みで指摘されている。また、GAM は乱流を介し静的帯状流 (ZF) とも結合しており、これらの過程は従来の帯状流理論では考慮されていない。上記の過程に加え、乱流は輸送を伴う巨視的構造とも結合することが指摘されており、帯状流を含む複数の乱流構造との非線形結合過程まで取り込んだ理解の進展が求められている。

2. 研究の目的

高エネルギー粒子の運動論的效果を取り入れた粒子加熱効果及び乱流輸送の特性を理論的に明らかにすることを目指す。

高エネルギー粒子が振動帯状流 (GAM) を励起し、駆動された GAM がイオン加熱へ重要な効果を持つ可能性が指摘されている。従来の帯状流乱流輸送理論には、これらの過程が考慮されていない。そこで高エネルギー粒子駆動 GAM の粒子加熱効果等を乱流輸送モデルに自己無頓着に取り入れることで、従来の乱流輸送理論を拡張し、高エネルギー粒子によるイオン加熱可能性を明らかにする。さらに GAM の非線形過程を考慮する事で、GAM の粒子加熱効果を含む帯状流理論の拡張を目指す。

その上で、ドリフト波乱流の非線形要素過程に着目し、帯状流を含む複数の乱流構造の共存・競合過程を示し、構造選択則及び乱流輸送特性の理解を目指す。

3. 研究の方法

帯状流乱流輸送理論に高エネルギー粒子の運動論的效果を導入し、従来の乱流理論を発展させるとともに、ドリフト波乱流による複数の乱流構造形成間の競合機構を考慮した乱流輸送特性の理解を進める。

高エネルギー粒子に駆動される GAM のイオン加熱効果に注目する。加熱効率は、GAM のパワー及びランダウ減衰で与えられるため、まず、ポロイダル固有値問題からランダウ減衰を明らかにする。また、ポロイダル固有関数を理論的に示す事で、実験観測における指針を与える事を目指す。その上で GAM の乱流を介在とした非線形

過程に着目することで、GAM の飽和振幅を求め、加熱効率を定式化する。

ドリフト波乱流の非線形過程から帯状流を含む複数構造との結合を取り込んだ乱流シミュレーションを実施する事で、乱流素過程の理解を進展させる。

4. 研究成果

本研究では、「高エネルギー粒子効果を取り入れた帯状流理論の拡張」及び「輸送を伴う乱流構造等の複数乱流構造間の非線形競合の問題」に取り組み以下のような成果が挙げられた。引用文献は「5. 主な発表論文等」の稿での番号に対応している。

高エネルギー粒子の運動論的效果として、GAM の特性に関する理論的研究を行った。ジャイロ運動論的方程式を基礎とし、GAM のポロイダル固有モード解析を行った。その結果、

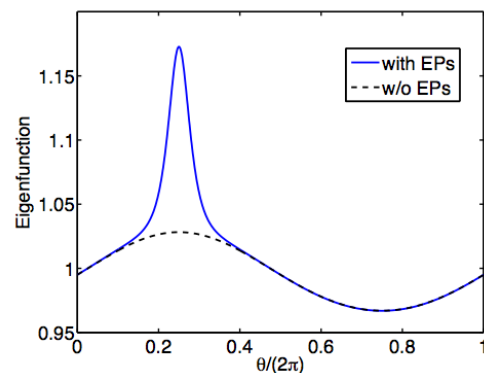


図 1: 高エネルギー粒子駆動 GAM ブランチのポロイダル固有関数

高エネルギー粒子の磁気ドリフト周波数が GAM 周波数を超えると、新しいブランチが存在する事が分かった。このブランチの周波数は高エネルギー粒子の磁気ドリフト周波数近傍であり、ポロイダル固有関数は図 1 に示すように、ポロイダル方向に急峻なピークを持つことが分かる。ポロイダル方向の急峻ピークにより、GAM の磁場方向波数は実効的に大きくなる。その結果、このブランチのランダウ減衰を大きいことが分かった。高エネルギー粒子のエネルギーが高くなる場合、イオン加熱に期待できるブランチであることが分かった (M. Sasaki, to be submitted)。

このような GAM の加熱効果や輸送抑制効果を決めるためには GAM の飽和振幅を求める必要がある。そこで、流体的モデルにおいて、レイノルズ応力を通じた乱流との非線形結合を取り入れたモデルを採用し、GAM の非線形分散関係を導いた。GAM の飽和振幅とともに、非線形伝播則を得た。乱流との非線形結合があると、線形理論に依る予測の 10-100 倍程度まで半径方向群速度が早くなり、GAM の輸送抑制効果や加熱効果がプラズマの広い領域に及び可能性を指摘した[2]。

GAM の非線形モデルをもう 1 つの帯状流ブランチである ZF を含む形に拡張した。GAM は

定在波成分を持つ場合を考える事で、異なる進行方向間の非線形結合が加わる。この非線形結合がZFの駆動を担う可能性を指摘した。ZFを含んだ形の結合方程式を導き、GAMとZFが競合し、どちらか一方が生き残る解に加え、両者が共存できる解が存在する事が分かった。この飽和状態の選択には、乱流の径方向スペクトルの非対称性が重要なパラメタであることが分かった[1]。

乱流輸送特性の理解の更なる進展を目指し、帯状流だけでなく輸送を伴う乱流構造まで取り込んだ非線形競合の問題に取り組んだ。直線プラズマでの乱流シミュレーションを用い、ZF、ストリーマ、フルート構造の3者間非線形競合と乱流輸送特性間の対応関係を明らかにした。粒子ソース強度を変える事で、形成される密度勾配と、揺動エネルギーの関係を図2に示す。ソース強度が小さく、ドリフト波が励起しない場合、輸送は衝突輸送が重要となり、密度勾配は粒子ソース強度

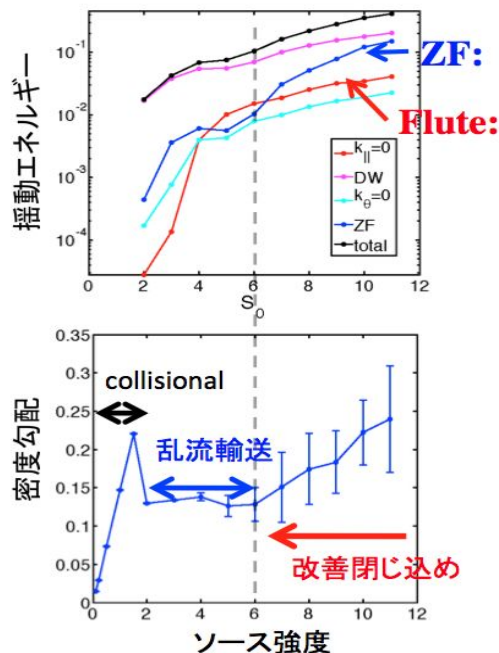


図2：乱流構造エネルギーと密度勾配に対する粒子ソース強度依存性

に比例して大きくなる。ストリーマやフルート構造が卓越する領域では密度勾配はソース強度に対する依存性は弱く、閉じ込めの悪い乱流状態が得られる。ソース強度が大きくなると、ZFが卓越する事で、密度勾配がソースと併に大きくなり閉じ込めが改善した様子が分かる。このように複数存在する乱流構造と輸送特性の関係を明らかにした[5]。さらにフルート構造が卓越する場合での粒子及び運動量輸送の統計的性質をまとめ、実験と同様の性質が得られた[3]。また、パラメタを時間的に変化させ、構造間遷移過程をシミュレーションにて再現した[4]。

ドリフト波乱流が形成する構造はZF、ストリーマ、フルート構造の他に孤立波構造があり、その形成機構も明らかにした。基本波と

高調波間の位相引き込みが生じる事で、孤立波特有の急峻な波面構造が維持される事を明らかにした。さらに急峻波面構造間の選択則を理論的に定式化した。この理論的表現は乱流シミュレーション及び実験観測と矛盾しないことが分かった[6]。

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)

[1] M. Sasaki, K. Itoh, S-I. Itoh, N. Kasuya

Zonal flows induced by symmetry breaking with existence of geodesic acoustic modes
Nucl. Fusion 52, 023009-1 023009-14 (2012)

[2] M. Sasaki, K. Itoh, N. Kasuya, K. Hallatschek, S.-I. Itoh

On a nonlinear dispersion effect of geodesic acoustic modes

Plasma and Fusion Research, 8, 1403010-1, 1403010-6 (2013)

[3] M. Sasaki, N. Kasuya, M. Yagi, K. Itoh, Y. Nagashima, S. Inagaki, S.-I. Itoh

Statistical analyses of turbulent particle and momentum fluxes in a cylindrical magnetized plasmas

Plasma and Fusion Research 8 (2013) 2401113-1, 2401113-5

[4] M. Sasaki, N. Kasuya, K. Itoh, M. Yagi, S-I. Itoh

Dynamical response of turbulent structures in cylindrical magnetized plasmas

JPS Conf. Proc. 1 (2014) 015011-1, 015011-5

[5] M. Sasaki, N. Kasuya, K. Itoh, M. Yagi, S-I. Itoh

Nonlinear competition of turbulent structures and improved confinement in magnetized cylindrical plasmas

Nucl. Fusion 54, 114009-1, 114009-9 (2014).

[6] M. Sasaki, N. Kasuya, T. Kobayashi, H. Arakawa, K. Itoh, K. Fukunaga, T. Yamada, M. Yagi, S-I. Itoh

Formation Mechanism of Steep Wave Front in Magnetized Plasmas

Phys. Plasmas, 22, 032315-1, 032315-10 (2015)

[学会発表](計 17 件)

(国際会議)

[1] M. Sasaki, N. Kasuya, M. Yagi, K. Itoh,

Y. Nagashima, S. Inagaki, S.-I. Itoh
"Probability distribution functions of particle and momentum fluxes in resistive drift wave turbulence in cylindrical magnetized plasmas"
Toki Conference, Toki, P2-8 (poster) (2012)

[2] M. Sasaki, N. Kasuya, K. Itoh, M. Yagi, S.-I. Itoh
Nonlinear competition of zonal flow, flute structure and streamer in resistive drift wave turbulence in cylindrical plasmas
The 12th Asia Pacific Physics Conference, Makuhari, D1-4-02 (oral) (2013) 17 July

[3] M. Sasaki, N. Kasuya, K. Itoh, M. Yagi, Y. Nagashima, S. Inagaki, S.-I. Itoh
Dynamical response of a poloidal flow with particle source modulation
14th International Workshop on H-mode, Fukuoka, P1-08 (poster) (2013) Oct. 2

[4] M. Sasaki, N. Kasuya, K. Itoh, M. Lesur, S.-I. Itoh
Eigenmode analysis of geodesic acoustic modes induced by energetic particles
4th Asia Pacific Transport Working Group International Conference, Fukuoka, E01 (oral) (2014) June. 12

[5] M. Sasaki, N. Kasuya, T. Kobayashi, H. Arakawa, T. Yamada, K. Fukunaga, M. Yagi, K. Itoh, S.-I. Itoh
Formation mechanism of steep wave front in drift wave turbulence
24th International Toki Conference, Toki, P6-42 (poster) (2014) Nov. 6

(国内学会)

[6] 佐々木真, 糟谷直宏, 稲垣滋, 藤澤彰英, 矢木雅敏, 伊藤公孝, 伊藤早苗
「PANTAにおけるバイアス実験の数値シミュレーション(揺動の時空間構造)」
25aYE-3 (2012) 3月25日 第67回日本物理学会年会 (関西学院大)

[7] 佐々木真, 糟谷直宏, 矢木雅敏, 伊藤公孝, 永島芳彦, 稲垣滋, 伊藤早苗
「直線磁化プラズマにおける抵抗性ドリフト波乱流の揺動とその高次モーメントの確率密度関数」
21aFA-3 (2012) 9月21日 日本物理学会2012年秋季大会 (横国大)

[8] 佐々木真, 糟谷直宏, 矢木雅敏, 伊藤公孝, 伊藤早苗
「抵抗性ドリフト波乱流における複数の乱流構造間の競合」
25aKC-10 (2013) 9月25日 日本物理学会

2013年秋季大会 (徳島大)

[9] 佐々木真
受賞記念講演 (第18回学術奨励賞)
「振動帯状流の非線形分散関係とダイナミクスに関する理論研究」
(2013) 12月3日 第30回プラズマ核融合学会年会 (東工大)

[10] 佐々木真, 糟谷直宏, 伊藤公孝, 矢木雅敏, 伊藤早苗
「粒子ソース変調を加えた直線プラズマの乱流シミュレーションによる抵抗性ドリフト波乱流の動的応答」
(2013) 12月5日 第30回プラズマ核融合学会年会 (東工大)

[11] 佐々木真, 糟谷直宏, 福永航平, 稲垣滋, 伊藤公孝, 矢木雅敏, 伊藤早苗
「抵抗性ドリフト波乱流における構造形成シミュレーション」
(2013) 12月19日 第11回核燃焼プラズマ統合コード研究会 (トロイダルプラズマ統合コード研究会) (九大応力研)

[12] 佐々木真, 糟谷直宏, 小林達哉, 福永航平, 矢木雅敏, 伊藤公孝, 伊藤早苗
「抵抗性ドリフト波乱流における孤立渦構造の選択則」
(2014) 3月30日 第69回日本物理学会年次大会 (東海大学) 30aAE-7

[13] 佐々木真
「乱流実験と協調したシミュレーション研究」
(2014) 6月6日 リアムフォーラム (九州大学筑紫キャンパス)

[14] 佐々木真, 糟谷直宏, 山田琢磨, 矢木雅敏, 伊藤公孝, 伊藤早苗
「直線プラズマにおける周方向流れの駆動と乱流構造形成」
(2014) 9月11日 プラズマシミュレータシンポジウム (NIFS)

[15] 佐々木真, 糟谷直宏, 伊藤公孝, Maxime Lesur, 伊藤早苗
「Non-equilibrium and extreme state - Heating effect on bulk ions by energetic particle driven GAMS -」
(2014) 11月21日 プラズマコンファレンス (新潟) 21aC1-5

[16] 佐々木真, 糟谷直宏, 矢木雅敏, 伊藤公孝, 伊藤早苗
「Formation Mechanism of Steep Wave Front in Magnetized Plasmas」
(2014) 12月11日 第12回核燃焼プラズマ統合コード研究会 (福岡)

[17] 佐々木真

「振動帯状流の時空間構造とエネルギー移送に関する理論的研究」

(2015) 3月22日 日本物理学会第70回年次大会 (東京、早稲田大学)22aAP-8 (受賞記念講演)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐々木 真 (SASAKI, Makoto)

九州大学応用力学研究所・助教

研究者番号：70575919