

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月17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：2010～2011

課題番号：22840034

研究課題名（和文）

トロイダルプラズマにおける帯状流の大域構造を考慮した輸送モデルに関する研究

研究課題名（英文）

Study of transport model with global structure of zonal flows in toroidal plasmas

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

研究成果の概要（和文）：

トロイダルプラズマにおける乱流輸送理論の大域的モデルを構築することを目指している。トロイダルプラズマでの帯状流には、静的帯状流（ZF）と振動帯状流（GAM）ある。GAMとZF間の非線形過程を考慮した乱流輸送モデルを構築し、大域的乱流輸送モデルへの進展を得た。さらに帯状流-乱流モデルにプラズマ境界の効果をモデル的に取り入れ、帯状流による平均流駆動の可能性を議論した。また、高エネルギー粒子駆動 GAM のランダウ減衰を介したイオン加熱効果も明らかにし、新しいイオン加熱方法の1つを提案した。

研究成果の概要（英文）：

The purpose of this study is to construct global transport mode in toroidal plasmas. There are two branches of zonal flows; stationary and oscillatory zonal flows (ZF, GAM, respectively). The turbulence transport model that can describe the nonlinear coupling between GAMs and ZFs is formulated, which is the progress towards the global transport model. The effect of plasma boundary is introduced in the turbulence-zonal flows model, and the possibility of generation of macro-scale mean flow is discussed. The novel ion heating method is also proposed, in which the GAMs driven by energetic particles heat ions through Landau damping.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,170,000	351,000	1,521,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,170,000	651,000	2,821,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：プラズマ物理

1. 研究開始当初の背景

核融合プラズマの閉じ込め時間（エネルギー輸送）はプラズマ乱流が規定している。急峻な温度勾配により強い乱流が生まれ勾配を打ち消す。一方、乱流は(巨視的、メソスケール

ルな)流れを駆動する。乱流に励起された流れは、乱流自身を規定するため、乱流に励起される流れを理解することは閉じ込めプラズマ研究の中心的課題である。乱流に駆動されるメソスケールの流れの中でも帯状流(静的帯

状流 (ZF)、振動帯状流 (GAM)) は輸送抑制効果を持つため、特に注目されている。理論研究においては、帯状流の波長と勾配長のスケール比が無視できるほど小さいという局所的モデルが用いられおり、帯状流と乱流の非線形結合の研究が精力的に行われている。帯状流と乱流間のエネルギー密度分配比の理解が進んでいる。しかし、帯状流の大域的空間分布の理解が遅れているため、揺動存在領域での体積積分量であるエネルギー分配比の理解が進んでいない。そのため、帯状流のエネルギー閉じ込め時間への効果が明らかになっていない。

2. 研究の目的

本研究では、帯状流 (静的帯状流 (ZF)、振動帯状流 (GAM) を同時に考慮) のエネルギー閉じ込め時間つまり乱流輸送への効果を理論的に明らかにすることを目的とする。これまでの理論研究では、ZF と GAM 間の非線形結合が考慮されていないため、大域的な乱流輸送を統一的に理解されていない。そのため、帯状流と乱流間のエネルギー密度分配比の報告はあるが、その体積積分量であるエネルギー分配比の理解は進んでいない。そこで本研究では、ZF、GAM 間の非線形過程を考慮した乱流輸送モデルを構築し、大域的乱流輸送モデル構築へ向けた研究を行う。また、研究を進展させ、高エネルギー粒子が存在する場合の帯状流の働きについても解析を行う。

3. 研究の方法

研究ではまず、静的帯状流 (ZF)、振動帯状流 (GAM) 間の非線形結合を議論する。ZF や GAM は減衰率のプラズマパラメタ依存性により、それぞれの存在可能領域が決定されるが、GAM 自身の非線形結合から ZF 成分が生み出されるため、単純に減衰率のみで存在領域を特定できない。そのため、ZF と GAM の高次までの非線形結合を考える必要がある。さらに、ZF や GAM は有限の存在領域をもつため、プラズマ境界の効果も理論に取り入れる必要がある。また、高エネルギー粒子が存在する場合の GAM の背景プラズマにもたらす効果も明らかにする。

4. 研究成果

静的帯状流 (ZF) と振動帯状流 (GAM) を同時に考慮した場合の大域的乱流輸送を理論的に明らかにすることを目指している。平成22年度は、プラズマ境界付近で支配的となる GAM が乱流輸送へ及ぼす効果、さらには、高エネルギー粒子が駆動する GAM が直接背景プラズマへ及ぼす効果のそれぞれの過程を理論的に

指摘した。平成23年度は、GAM と ZF の高次非線形競合過程まで取り入れたモデルを導出し、そのモデルをもとに新しい定常的な乱流状態を理論的に発見した。さらに、プラズマ境界効果を、帯状流乱流輸送理論に導入することを目指し、研究の第一段階の結果を得た。以下にそれぞれを説明する。

(1) GAM が駆動する ZF の効果 : GAM は境界近傍で定在波成分を持つ。つまり、径方向の正方向へ進行する波と負方向へ進行する波が同時に線形不安定になる [M. Sasaki, et. al., Contrib. Plasma Phys 08]。この場合、位相速度の正負の GAM 同士の非線形結合が可能になり、ZF が駆動される [M. Sasaki, et. al PPCF 09]。

この過程を記述する理論モデルを以下のように発展させた。GAM、ZF による乱流抑制効果を考慮し、乱流、GAM、ZF 間結合方程式を導いた。ここでは、GAM による ZF の駆動効果に着目し、GAM に駆動される ZF の高次非線形性は無視しモデルを採用した。さらに GAM のランダウ減衰、乱流粘性による減衰率のパラメタ依存性を導入することで、駆動される ZF の実験パラメタに関する依存性を明らかにし、効率よく ZF が駆動されるパラメタ領域を指摘した。図 1 に GAM が駆動する ZF の振幅の安全係数依存性を示す。ZF の振幅は、ZF の成分の乱流からのキックの強さで規格化している。安全係数が 2~3 程度の領域では、駆動される ZF はキックの 5 倍程度増幅され、効率よく ZF が駆動していることがわかる。しかし、この ZF は有限時間で減衰し、過渡的にのみ存在する。

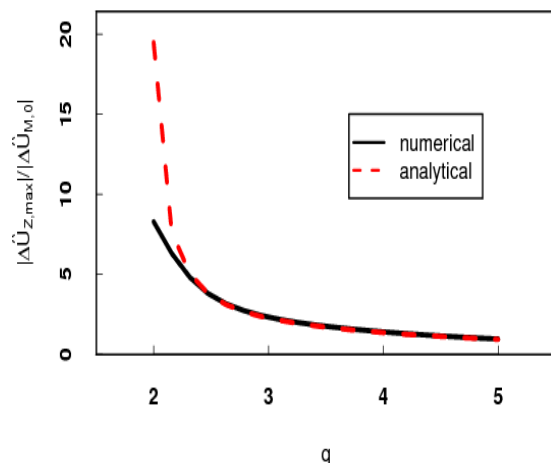


図 1 : GAM が駆動する ZF の振幅の安全係数依存性

(2) GAM が背景プラズマへ与える効果 : 中性粒子ビーム入射等によりプラズマに高エネルギー粒子が存在する場合、運動論的效果に

より GAM が駆動されることが指摘されている。一方 GAM はイオンランダウ減衰するため、イオン加熱効果を持つ。高エネルギー粒子から GAM を介した新しいイオン加熱機構が存在することを指摘した (GAM channeling)。

GAM イオン加熱効率を準線形理論の枠組みで定式化した。さらに、高エネルギー粒子がクーロン衝突によって背景イオンを加熱する効果と、GAM channeling による GAM を介したイオン加熱効果を比較し、GAM channeling が無視できない効果であることを理論的に明らかにした。図 2 に高エネルギー粒子 GAM のイオン加熱効率を示す。ここで、加熱効率は高エネルギー粒子がクーロン衝突でイオンを加熱する効率で規格化している。規格化加熱効率が 1 程度であり、クーロン衝突と比べ無視できないことがわかる。従来、プラズマ温度が高い場合、高エネルギー粒子は電子加熱に寄与しイオン加熱に効果がなくなるという問題が指摘されてきたが、GAM channeling はプラズマ温度が高い場合でも、イオン加熱に寄与できる。将来の核融合炉におけるイオン加熱方法の 1 つに期待される過程である。

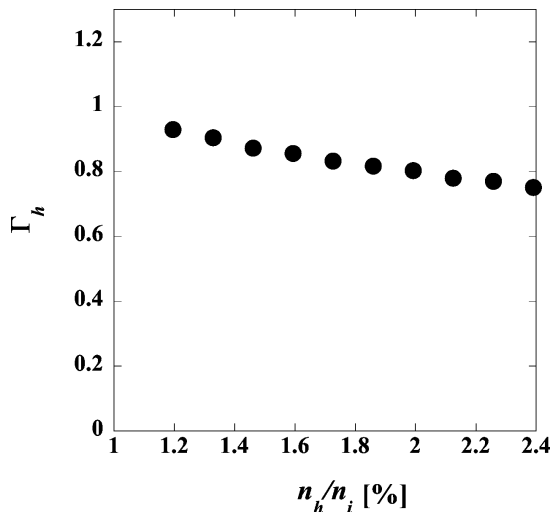


図 2 : 高エネルギー粒子駆動 GAM の背景イオン加熱効率の高エネルギー粒子密度依存性

(3) GAM と ZF の高次非線形競合過程 : 大域的な乱流輸送を理解すべく、(1) で解析した乱流-帯状流モデルの拡張を行った。乱流、GAM、ZF の非線形結合過程に高次非線形競合項を導入し、定常的な解の性質を調べた。

GAM による ZF の駆動項が乱流の伝播が径方向の非対称性から生まれていることを明らかにした。その GAM による ZF の駆動項の大きさによって、定常状態をいくつかに分類でき、定常状態は乱流のみ、乱流と ZF、乱流と GAM の 3 種類の解を持つ。各定常状態の安定性は、減衰率、駆動力で与えられ、各状態を規定する条

件の解析的表現を得た。さらに GAM の ZF 駆動力が大きくなる場合、乱流と GAM、ZF が共存する定常解も安定になりうることを理論的に指摘した。図 3 に乱流と GAM のみの解が安定な状態と乱流、GAM、ZF が共存出来る状態を示した相図を示す。これは GAM に駆動される定常的な ZF の振幅の等高線をしめしており、横軸は乱流スペクトルの不均一性、縦軸は位相速度正負を持つそれぞれの GAM 振幅の初期値の差を示している。図にあるように、乱流スペクトルの不均一性が大きくなると、定常的に ZF が駆動されることが分かる。乱流-帯状流系の乱流輸送を包括する理論モデルとなっている。

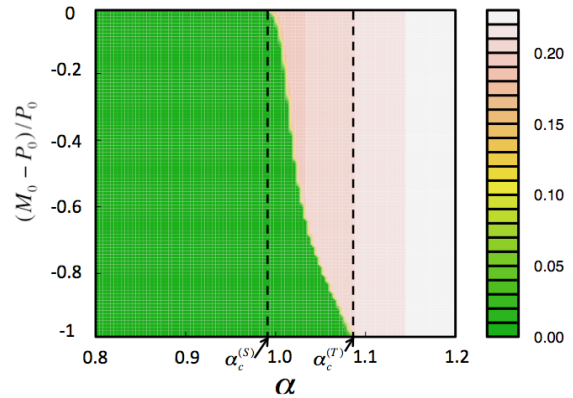


図 3 : 定常的 ZF が駆動される領域を示した相図 (横軸は乱流スペクトルの不均一度合い、縦軸は位相速度正負を持つそれぞれの GAM 振幅の初期値の差)

(4) 帯状流による大規模平均流の駆動の可能性 : 乱流-帯状流モデルにプラズマ境界の効果を導入し、さらなる発展を試みた。GAM はプラズマの境界の外には分散関係が存在しないためプラズマ境界で反射するが、ZF は周波数ゼロのため、境界で反射されない。この効果を、結合方程式にモデル的に導入した。GAM 成分は境界でゼロ、零周波数の波 (平均流、ZF) の境界での合計値は境界の外の流れで規定されるとした。ポロイダル方向の運動量を持つ ZF がプラズマの外へ流出するためにプラズマ内はポロイダル運動量を失う (図 4)。このポロイダル運動量損失分が平均流の駆動に現れる。実現する平均流は反磁性ドリフト速度程度の大きさを持ちうるということがわかった。研究の第一段階としての結果を得ることができた。この効果は強い平均流によって実現する H mode の形成機構の 1 つの候補と考えられ、さらなる研究を要する重要な課題である。

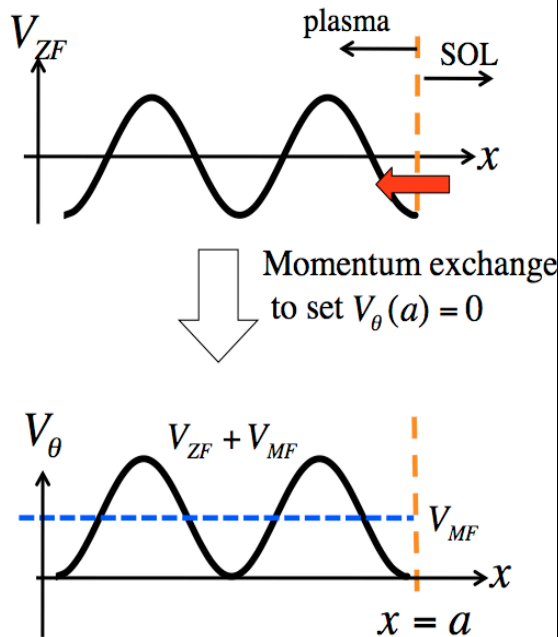


図4：プラズマ境界近傍での ZF による平均ポロイダル運動量損失の様子

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4件)

- ① M. Sasaki, K. Itoh, S-I. Itoh, N. Kasuya `` Zonal flows induced by symmetry breaking with existence of geodesic acoustic modes `` , Nuclear Fusion, 52, 023009-1, 023009-14 (2012) 査読あり
- ② M. Sasaki, K. Itoh, S-I. Itoh, N. Kasuya `` Nonlinear processes of zonal flows near a plasma edge `` , 1st Plasma Conference, 24D07 (2011) 査読なし (プロシーディングス)
- ③ M. Sasaki, K. Itoh, S-I. Itoh, `` Energy channeling from energetic particles to bulk ions via beam driven geodesic acoustic mode - GAM channeling `` , Plasma Phys. Control. Fusion, 53, 085017-1, 085017-11 (2011) 査読あり
- ④ M. Sasaki, K. Itoh, S-I. Itoh, M. Yagi, A. Fujisawa, `` Dynamics of low frequency zonal flow driven by geodesic acoustic modes `` , IAEA Fusion Energy Conference, THC/6-2Rb-1 THC/6-2Rb-8 (2010) 査読あり (プロシーディングス)

[学会発表] (計12件)

- ① 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)」、2012年3月25日、関西学院大学、兵庫
- ② 佐々木真, 伊藤公孝, 伊藤早苗, 糟谷直宏
「プラズマ境界近傍における測地線音波の非線形過程」、Plasma Conference 2011、2011年11月24日、石川音楽堂、金沢
- ③ M. Sasaki, K. Itoh, S-I. Itoh, N. Kasuya `` Nonlinear theory of GAMs `` , International workshop on zonal flows and GAMs, 2011年6月8日、九州大学、福岡
- ④ M. Sasaki, K. Itoh, S-I. Itoh, N. Kasuya `` On the mechanism of mean flow generation by GAMs in edge plasmas `` , Meeting on Studies of H-mode Physics, 2011年9月30日九州大学、福岡
- ⑤ M. Sasaki, K. Itoh, S-I. Itoh, N. Kasuya `` Nonlinear processes of zonal flows near a plasma edge `` , Workshop on Physics of plasma turbulence and data analysis, 2011年11月10日、九州大学、福岡
- ⑥ M. Sasaki, K. Itoh, S-I. Itoh, N. Kasuya `` Energy channeling from energetic particles to bulk ions via beam-driven geodesic acoustic modes -GAM channeling `` , Colloquium at MAST and JET, 2011年10月14日、Oxford, UK
- ⑦ M. Sasaki, K. Itoh, S-I. Itoh, N. Kasuya `` Nonlinear propagation characteristics of geodesic acoustic modes `` , 13th International Workshop on H-mode Physics and Transport Barriers, 2011年10月11日 Oxford, UK
- ⑧ M. Sasaki, K. Itoh, S-I. Itoh, N. Kasuya `` Zonal flows induced by geodesic acoustic modes `` , 1st Asia Pacific Transport Working Group (APTWG) International Conference, 2011年6月15日、NIFS, Gifu
- ⑨ 佐々木真, 伊藤公孝, 伊藤早苗 「GAMの径方向伝播に関する選択則」日本物理学会第66回年次大会、2011年3月新潟 (webのみで公開)

⑩ M. Sasaki, K. Itoh, S-I. Itoh, `` Characteristics of bulk ion heating by geodesic acoustic modes `` , 20th International Toki Conference, 2010年12月7日, 岐阜、日本

⑪ M. Sasaki, K. Itoh, S-I. Itoh, M. Yagi, A. Fujisawa, `` Dynamics of low frequency zonal flow driven by geodesic acoustic modes `` , 23rd IAEA Fusion Energy Conference (FEC 2010), Daejeon, KOREA, 2010年10月15日

⑫ 佐々木真, 伊藤公孝, 伊藤早苗 「高エネルギー粒子駆動GAMによる背景イオン加熱」日本物理学会 2010年秋季大会、大阪、日本、2010年9月25日

[その他]

ホームページ :

<http://hyoka.ofc.kyushu-u.ac.jp/search/details/K003601/index.html>

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

(2) 研究分担者

該当者なし ()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

該当者なし ()

研究者番号 :