

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 4 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23360414

研究課題名(和文)直線磁化プラズマにおけるイオン温度揺動の観測及び揺動駆動輸送の評価

研究課題名(英文) Observation of ion temperature gradient mode and evaluation of fluctuation-driven heat flux in a linear magnetized plasma

研究代表者

稲垣 滋 (INAGAKI, Shigeru)

九州大学・応用力学研究所・教授

研究者番号：60300729

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では核融合プラズマの主要な損失機構であるイオン温度勾配不安定性に関して、実験室プラズマを用いて同定及び駆動される輸送の評価法の開発を行った。本研究の成果以下に示す。(1)シミュレーションを活用し、イオン温度勾配モードが不安定となる実験条件を予測し、実際にイオン温度勾配モードの特徴を多く有する揺動の励起に成功した。(2)イオン温度揺動を観測するための信号処理法を開発し、イオンセンシティブプローブを用いて電位揺動に同期したイオン温度揺動振幅の抽出に成功した。更にこの手法を発展させ、温度揺動と電位揺動の位相差を観測し、揺動駆動熱流束の評価も可能とした。

研究成果の概要(英文)：In fusion plasmas, radial ion heat transport driven by ion temperature gradient (ITG) instability is considered to be dominant. Here we have observed ITG-like fluctuations and developed analysis method for evaluating a fluctuation-driven heat transport in the linear plasma device. The main results are the following: (1) We calculated the linear growth rate of ITG modes by a three-field fluid model and found unstable domain. Then we have succeeded to observe a fluctuation propagating in the ion diamagnetic drift direction, which co-exists with drift waves propagating in the electron diamagnetic drift direction. (2) We developed a conditional sampling method and succeeded to extract the ion temperature fluctuation amplitude synchronized with the floating potential fluctuation. In addition, we improved the method and observed the phase difference between temperature and potential fluctuations, which allows us to evaluate the fluctuation-driven heat flux.

研究分野：プラズマ物理学

キーワード：プラズマ乱流 イオン温度勾配不安定性 温度揺動 熱輸送

1. 研究開始当初の背景

(1) 磁場閉じ込め核融合プラズマにおいて、イオン温度勾配不安定性によって駆動される熱流束がエネルギー閉じ込めを支配していると考えられており、イオン温度勾配モード乱流を抑制できなければ ITER (国際熱核融合実験炉) での自己点火達成は困難である事が指摘された[1]。しかし、乱流の非線形相互作用で形成される zonal flow によりイオン温度勾配不安定性は抑制される事が理論的に明らかにされ[2]、磁化プラズマ中に zonal flow が形成される事は多くの実験で検証された[3]。一方、イオン温度勾配不安定性による揺動及び輸送は実験により観測されていない。イオン温度勾配不安定性による揺動を観測し、輸送との因果関係を検証する事は急務の課題であった。

(2) イオン温度勾配不安定性の同定のためには揺動の同時多点計測が必要であるが、高温トロイダルプラズマではプラズマへのアクセスが制限されるためその実現は困難である。一方、基礎プラズマ実験では、プラズマ中にプローブを挿入する事により、高い時間・空間分解能で揺動を計測する事が可能であるが、イオン温度揺動計測法は確立されていなかった。

(3) 近年、基礎プラズマを用いたドリフト波揺動の研究が行われ様々な実験解析技術が開発されてきた。これらを適用すれば、基礎プラズマを用いてイオン温度勾配不安定性の研究が可能であるとの着想を得た。

2. 研究の目的

本研究では、磁場核融合プラズマの閉じ込めを劣化させるイオン温度勾配不安定性を実験室プラズマ中に励起し、密度揺動、電位揺動に加えイオン/電子温度揺動を計測する。イオン温度勾配不安定性が駆動する磁場を横切る粒子束と熱流束の観測により、温度勾配不安定性の輸送への影響を評価する。

3. 研究の方法

九州大学の直線磁化プラズマ PANTA を用いて実験を行う。本研究の要素は、(1)イオン温度勾配不安定性の励起、(2)温度揺動計測法を確立、(3)イオン温度勾配不安定性の観測と揺動駆動輸送の評価である。それぞれの要素に対する手法について以下に述べる。

(1) 数値直線プラズマを用いて PANTA プラズマに励起される揺動をシミュレーションする。パラメータサーベイを行い、イオン温度勾配モードが不安定化する条件を策定する。

(2) イオン温度はイオンセンシティブプローブ及びレーザー誘起蛍光法により計測する。プローブは多チャンネル化が容易であるが、プローブ理論モデルに由来するイオン温度計測のあいまいさを検証するため LIF による検証を行う。PANTA プラズマでは電子とイオンのラーマ半径にはおよそ 100 倍の違いがあるため、イオンプローブによるイオンのみ

の捕集が可能である[4]。イオン温度計測に対して Conditional Sampling 法を適用し[5]、イオン温度揺動振幅を計測する。更に LIF で校正したプローブを多チャンネル化し、イオン温度揺動の時空間構造を計測し、ITG を同定する。

(3) (1)で策定した実験条件で揺動の観測を行う。そして揺動駆動熱流束の評価のため、温度揺動と電位揺動の位相差と振幅を観測する。密度揺動の同時計測により熱対流項も含めた熱流束を評価する。

4. 研究成果

(1)イオン温度勾配不安定性の励起

PANTA で実験的に観測されているプラズマを想定してパラメータを設定し(密度 10^{19} m^{-3} 、密度勾配長 50mm、イオン温度 0.3eV、温度勾配長 250mm、電子温度 3eV)、イオン温度勾配モードの励起、伝播、減衰を 2 流体モデルで記述した。連続の式、運動量保存式、エネルギー保存式、電子の断熱条件とプラズマの準中性条件から波の微小振幅に関する連立方程式を得て、それを数値的に解いた。その結果これまで行って来た PANTA 実験のプラズマパラメータではイオン温度勾配不安定性は安定である事を確認した。次に広範なサーベイを行い不安定領域を求めた。図 1 はイオン温度勾配モードが不安定となる磁場強度 B 、プラズマ半径 a の領域を示している。 $(m, n) = (2, 2), (4, 2)$ の 2 つの不安定となるモードを例示している。ここで m, n は周方向モード数、軸方向モード数である。磁場が弱い時は比較的大きい m の、磁場が強い時は小さい m のモードが不安定化する。系統的なサーベイを行い、 $B = 0.04 \text{ T}$ 、 $a = 50 \text{ mm}$ の条件で、 $(m, n) = (2, 2)$ のモードの線形成長率が最も大きくなる事が明らかになった。イオン温度勾配モードの励起のための実験条件として、これまでの PANTA 実験における標準的な磁場強度 (0.06-0.15T) よりも低い磁場 $B = 0.04 \text{ T}$ が好ましいと考えられる。

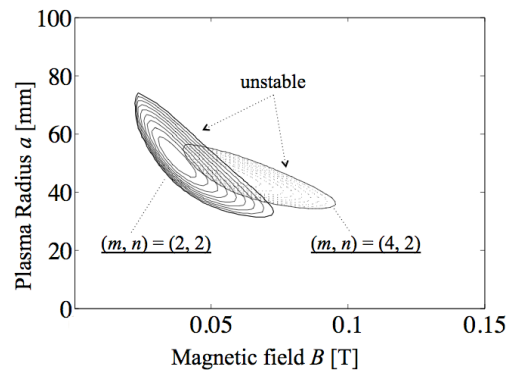


図 1: イオン温度勾配モードの安定性ダイアグラム

実験でイオン温度勾配モードを同定する

場合には、共存する他のモードとの違いを捉えることが必要となる。PANTA では周方向及び軸方向の揺動モード構造が観測されており、イオン温度勾配モード同定の指標として議論できる。

(2) イオン温度揺動計測法の確立

図2に本研究で開発したイオンセンシティブプローブの概略図を示す。溝の深さ h を変化させる事によって、イオンの分離捕集を行う。 h が小さい場合、図2に示すように、正バイアス(電子電流捕集領域)にて電子がプローブ到達・捕集されてしまう。 h を大きくする事で正バイアスにてプローブ電流を0にする事、すなわち電子を排除し、イオンのみを分離捕集する事に成功した。本研究では $h = 2\text{mm}$ を用い、イオン捕集電極の電流-電圧 ($I-V$) 特性からイオン温度を求めた。また、絶縁管の電位による $E \times B$ ドリフトを防ぐためのガード電極の $V-I$ 特性から電子温度を求める事が出来る。電流-電圧特性からイオン温度を求めた。イオン温度は 0.3eV 程度と評価できた。電子温度とイオン温度の比は、 $0.08-0.13$ であり、これまでの同様な直線プラズマでの計測結果と同様であった。

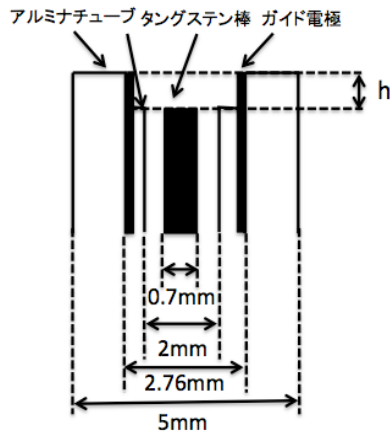


図2 本研究で制作したイオンセンシティブプローブ

イオン温度揺動は Conditional Sampling 法により求めた。この方法では、浮遊電位 (V_f) とイオン温度及び電子温度 (T_i, T_e) を同時計測し、浮遊電位揺動に同期した温度揺動を抽出する。浮遊電位の振幅によってプローブ特性曲線 V_p, I_p の信号を仕分ける。例として、浮遊電位が $1.83-2.10$ [V] の範囲に入る条件を赤色で仕分けした(図3)。仕分けされた信号から $I-V$ 特性曲線を再構築する。それぞれの $I-V$ 特性から浮遊電位の振幅に依存したイオン温度を求める事ができる。図4に Conditional Sampling 法によって求めたイオン温度と浮遊電位との相関を示す ($r = 20\text{ mm}$)。両者の間に強い正の相関が観測され、イオン温度の揺動レベルは約10%と推定された。ただし、非常に広帯域の揺動が励起される条件では温度と浮遊電位との間の相関が低い。この原因の一つに温度揺動と

電位揺動の間に位相差が存在する場合に揺動の Mixing が起こる事が考えられる。この問題は後述の Template 法により解決した。

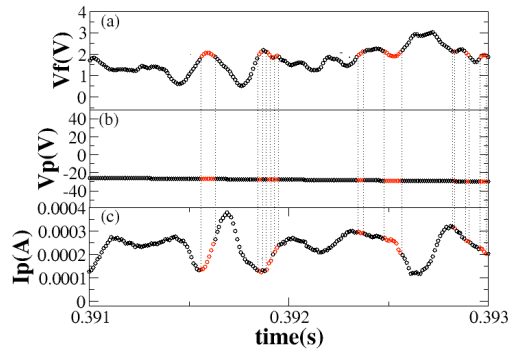


図3 Conditional Sampling 法の説明。(a)浮遊電位、(b)プローブ電圧(100Hz で-100V から100V まで掃引)、(c)プローブ電流、の典型的な時間発展波形。

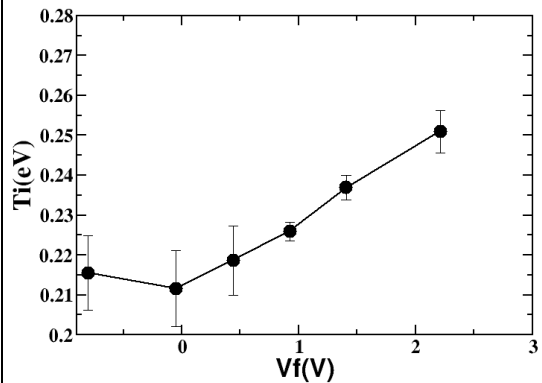


図4 Conditional Sampling 法により求めたイオン温度の浮遊電位依存性。

(3) イオン温度勾配モードの観測と揺動駆動輸送の評価

PANTA に励起される揺動は通常条件では電子反磁性方向に伝搬する。これはドリフト波の特徴である。しかし、成果(1)で予測した領域において、イオン温度勾配不安定性のようにイオン反磁性方向に伝搬する揺動の存在を観測した。プローブによる同時多点計測により、モード構造の同定を行ったところイオン温度勾配不安定性とは矛盾しないという結果得られた。シミュレーションでは $B = 0.04\text{ T}$, $a = 50\text{ mm}$ の条件で複数のモードが不安定となり共存すると予測され、実験でも揺動の共存が観測されている。今後の更なる検証のためにはイオン温度勾配不安定性の非線形数値解析が望まれる。

揺動の同定と併行して、揺動が駆動する熱流束の評価法の開発を行った。揺動駆動熱流束の評価には温度揺動と電位揺動間の位相差を観測する事が重要である。そこで新たな同期型の Conditional Sampling 法を開発した。

本手法は準周期的に変動する信号から template と呼ばれる基本変動パターンを抽出する手法である。ここでは浮遊電位の template を用いて浮遊電位自身との相関関数からトリガー列を構築する。template とトリガーは繰り返し計算を収束するまで行った。得られるトリガーを基準にして時間方向に Conditional Sampling を行った。結果を図5に示す。温度揺動、浮遊揺動及び密度揺動の振幅と位相関係の観測に成功した。温度揺動と浮遊揺動との位相差が分かれば伝導的熱流束を評価する事ができる。一方、密度揺動と浮遊揺動との位相差から対流的熱流束が得られる。r=40mm の位置では対流的熱流束の方が支配的である事が分かった。

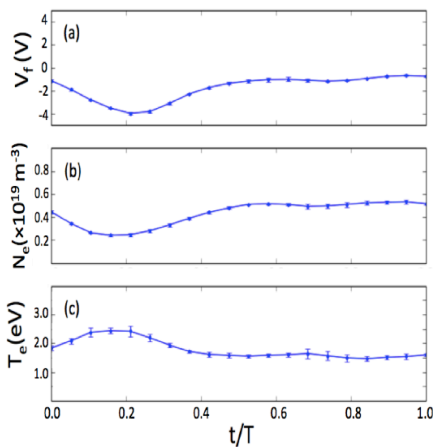


図5 Template 法により求めた(a)浮遊電位、(b)電子密度、(c)電子温度の位相関係。横軸の相対時間は浮遊電位の基本周期で規格化している。

- [1] J. Glanz, Science Vol. 274 1600 (1996)
- [2] M. N. Rosenbluth and F. L. Hinton, Phys. Rev. Lett. Vol. 80, 724 (1998)
- [3] A. Fujisawa et al., Phys. Rev. Lett. Vol. 93, 165002 (2004)
- [4] N. Ezumi et al., J. Nucl. Mater. Vol. 337-339, 1106 (2005)
- [5] Y. Nagashima et al., Phys. Plasmas Vol. 16, 020706 (2009)

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 15 件)

- ① Evaluation of Electron Temperature Fluctuations Using a Conditional Technique, S. Yamada, S. Inagaki 他 14 名, Plasma Fusion Res. Vol. 7, 2401133 (2012) DOI: 10.1585/pfr.7.2401133, 査読あり
- ② Identification of Quasi-Periodic Nonlinear Waveforms in Turbulent Plasmas, S. Inagaki, 他 13 名, Plasma Fusion Res.

Vol. 9, 1201016 (2014), DOI: 10.1585/pfr.9.1201016, 査読あり

③ Evaluation of Excitation Conditions of ITG Modes in the PANTA, Y. Miwa, N. Kasuya, M. Sasaki, S. Inagaki, 他 13 名, Plasma Fusion Res. Vol. 8, 2403133 (2013), DOI: 10.1585/pfr.8.2403133, 査読あり

④ Bi-coherence analysis of fluctuations with long distance correlation in toroidal plasmas, S. Inagaki, 他 13 名, J. Phys. Soc. Jpn. Vol. 81 (2012) DOI: 34501, 10.1143/JPSJ.81.034501, 査読あり

⑤ How is turbulence intensity determined by macroscopic variables in a toroidal plasma? S. Inagaki, 他 18 名, Nucl. Fusion Vol. 53 (2013) 113006, doi: 10.1088/0029-5515/53/11/113006, 査読あり

⑥ Dynamics of particle flux in a cylindrical magnetized plasma, S. Oldenbüger, S. Inagaki, 他 8 名, Plasma Physics and Controlled Fusion Vol. 54 (2012) 55002, doi:10.1088/0741-3335/54/5/055002, 査読あり

[学会発表] (計 26 件)

① Experimental evidence of interaction between edge and core transport in toroidal plasmas, S. Inagaki, 1st Asia Pacific Transport Working Group International Conference, 14-17 June 2011, Toki, Japan (Plenary Talk)

② Fluctuation with Long Range Correlation and Coupling with Plasma Turbulence in Toroidal Plasma, S. Inagaki, 他 15 名, 39th European Physical Society Conference on Plasma Physics and 16th International Congress on Plasma Physics, 2-6 July 2012, Stockholm, Sweden (Invited)

③ Turbulence Determined by Local Temperature Gradient?, S. Inagaki, 他 19 名, 24th IAEA Fusion Energy Conference, 8-13 Oct. 2012, San-Diego, USA

④ Dynamic Method to Study Turbulence and Turbulence Transport, S. Inagaki, 他 18 名, IAEA 25th Fusion Energy Conference, 13-18 Oct. 2014, Saint Petersburg, Russia

⑤ 直線装置 PANTA におけるイオン温度勾配モード励起条件の検討, 三輪祐大, 糟谷直宏, 稲垣滋, 他 8 名, 日本物理学会 2013 年度秋季大会, 2013 年 3 月 26-29 日, 広島大学

⑥ PANTA におけるイオン温度揺動と電位揺動間の位相差の評価, 稲垣滋, 他 13 名, 第 69 回日本物理学会年会, 2013 年 9 月 25-28 日, 徳島大学

⑦ 先進プラズマ乱流計測が描く新乱流輸送像, 稲垣滋, plasma conference 2014, 2014. 11. 19, 朱鷺メッセ

⑧ 磁化プラズマ装置 PANTA における揺動駆

動熱流束の評価, 中西康介, 稲垣滋, 他3名,
プラズマ・核融合学会 九州・沖縄・山口支
部第18回支部大会, 2014. 12. 21, 九州大学

[その他]

<http://www.riam.kyushu-u.ac.jp/koenezai/index-j.html> (2014年9月より)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

稲垣 滋 (INAGAKI Shigeru)
九州大学・応用力学研究所・教授
研究者番号: 60300729

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

糟谷 直宏 (KASUYA Naohiro)
九州大学・応用力学研究所・准教授
研究者番号: 20390635

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

江角 直道 (EZUMI Naomichi)
長野工業高等専門学校・電子制御工学科・准教授
筑波大学・数理物質科学研究科・准教授
研究者番号: 20321432