

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17797

研究課題名(和文)ミラー磁場配位における自発励起アルベン波動の境界条件および非等方性緩和の研究

研究課題名(英文) Study on the boundary condition of spontaneously excited Alfvén wave and relaxation of anisotropy in a mirror magnetic field configuration

研究代表者

池添 竜也 (IKEZOE, Ryuya)

筑波大学・数理解析系・助教

研究者番号：70582849

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)：複合ミラー磁場型プラズマ閉じ込め装置GAMMA 10では、ICRF加熱により強いイオン温度非等方性が形成され、アルベンイオンサイクロトロン(AIC)波動が励起される。不安定周波数帯に離散的に複数励起されるAIC波動の空間構造を、高速アンテナスイッチングを導入した2chマイクロ波反射計を用いて調べた。AIC波動に伴う密度揺動振幅の径方向分布、軸方向5点の分布、位相差分布の時間発展の計測に成功し、AIC波動間で異なる軸方向空間構造の存在が初めて見出された。また、AIC波動間の非線形結合により差周波揺動が特に径方向内側領域において生成され、非等方性の緩和に寄与していることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：Alfvén ion cyclotron wave is excited due to strong anisotropy of ion temperature, which is generated by ICRF heating in the GAMMA 10 tandem mirror device. Multiple AIC waves are simultaneously excited in an unstable frequency band as discrete peaks, of which spatial structure has been investigated by developing a two-channel microwave reflectometer with fast antenna switching. The radial profile, axial variation at five positions and phase profile of the density fluctuations accompanied by the AIC waves have been successfully measured along with those temporal evolution. A clear difference in the axial profile has been found among the AIC waves for the first time. In addition, it is indicated that the difference waves are generated by nonlinear coupling among the AIC waves, which contribute to the relaxation of temperature anisotropy.

研究分野：プラズマ物理

キーワード：波動計測 マイクロ波反射計 AIC波動 ICRF加熱 高エネルギーイオン計測 温度非等方性 スイッチングアンテナ 波動粒子相互作用

1. 研究開始当初の背景

宇宙プラズマ、磁場閉じ込め核融合プラズマ、一部の応用プラズマ等、広範囲に存在する磁化プラズマにおいて、磁場に垂直方向にのみ作用するローレンツ力の存在により非等方性は本質的である。磁化プラズマ中の集団運動に伴って現れる各種波動は興味深い物理現象であり、これまでに T.H. Stix 著「Waves in Plasmas」に代表される様に学術的に整理されている。ところが磁化プラズマの重要な性質である温度非等方性に関しては解析的取扱いの困難さから特殊な条件における取扱いがなされているのみである。

非等方性が関与する未解明の波動物理現象として、アルペンイオンサイクロトロン (AIC) 波動の詳細な励起機構と非等方性の緩和機構がある。AIC 波動は磁気圏及び地上では高温プラズマの磁場閉じ込め方式の一つであるタンデムミラー装置においてこれまでに観測されている。イオンの速度分布関数が極端に非等方になることにより不安定化されるイオンサイクロトロン周波数帯 (ICRF) のアルペン遅波である。磁気圏ではミラー磁場に補足されたイオンの温度非等方性に上限があり、磁力線方向のベータ値の増大が AIC 波動の励起と相関することが報告されている。その機構として AIC 波動によるイオンのピッチ角散乱 (磁力線に垂直方向のエネルギーの平行方向への輸送) が提案されている (B.J. Anderson et al., J. Geophys. Res. 99, 5877 (1994))。

一方、筑波大学にある大型タンデムミラー装置 GAMMA 10 では、高出力の ICRF 波動を用いた磁力線に垂直方向へのイオン加熱の結果として AIC 波動の励起が観測されている (図 1 参照)。AIC 波動の励起に伴って非等方性の緩和と蓄積エネルギーの飽和が観測されている (M. Ichimura et al., Phys. Rev. Lett. 70, 2734 (1993))。また、GAMMA 10 では周波数スペクトル上に離散的な複数のピークとして複数の AIC 波動が同時に観測され、不安定な周波数範囲にある境界条件を満たす固有モードとして励起されていると考えられる。

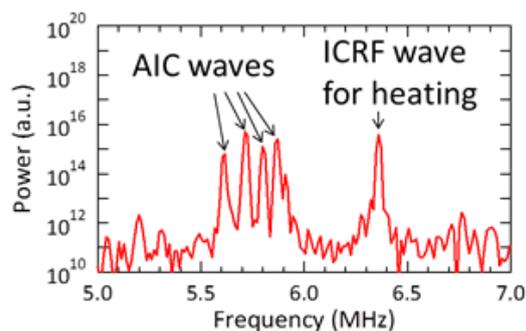


図 1 GAMMA 10 センtral部における磁場揺動の周波数スペクトル

2. 研究の目的

GAMMA 10 ミラー磁場中での温度非等方性の緩和は、波動粒子相互作用を通じた AIC 波動による効果と考えられるが、GAMMA 10 で生成される高温プラズマ中での波動の空間構造や粒子計測の困難さから波動の詳細な境界条件、非等方性の緩和過程は解明されていない。本研究課題では GAMMA 10 において温度非等方性の分布を積極的に変化させる方法を確立し、高温プラズマ中の波動計測器の開発と併せて、ミラー磁場における温度非等方性が駆動する不安定波動の境界条件および温度非等方性の緩和過程を解明することを目的とする。

3. 研究の方法

マイクロ波の反射という強い相互作用により、非接触に局所計測が可能なマイクロ波反射計を高度化させ、高温プラズマ内部領域における AIC 波動の時空間発展を調べる手法を確立する。ミラー磁場閉じ込めプラズマでは磁力線方向にプラズマパラメータが大きく変化し、環状系のプラズマ閉じ込め装置における大円周方向への対称性に対応するものや、さらに各種アルペン固有モードを規定する磁力線の回転変換がない。従って、AIC 波動の境界条件には磁力線方向へのパラメータ変化が本質と予想されるため、磁力線方向への多点計測化を重点的に行う。

また、AIC 波動の励起の詳細、非等方性の緩和機構解明のためには、未解明の波動の境界条件を積極的に調べる手法が必要である。GAMMA 10 においてプラズマは ICRF 波動を用いて生成・加熱しており、通常の運転から外れて、AIC 波動の駆動力であるベータ値と温度非等方性の磁力線方向分布を変化させる ICRF 加熱手法を見付ける必要がある。そこで、GAMMA 10 で使用されている三系統の ICRF 加熱システムの配位をさまざまに変更し、GAMMA10 において異なる温度非等方度分布を形成する手法を確立する。AIC 波動の境界条件を積極的に変更できるように加熱システムの最適化を図り、達成された様々なパラメータ分布において確立した AIC 波動の空間構造計測を実施する。パラメータ分布の変化による空間構造の遷移情報などから AIC 波動の境界条件を明らかにする。波動との相互作用の結果として磁力線方向に損失するイオンの振る舞いを詳細に調べる検出器を整備し、波動の空間構造計測結果と総合して、非等方性の緩和機構を解明する。

4. 研究成果

本研究課題遂行の要である高温プラズマ内部領域における波動計測器を、マイクロ波反射計を高度化 (高精度化、高機能化) させて完成させた。GAMMA 10 センtral部の真空容器とプラズマは直径がそれぞれ 1 m、0.36 m であり、空いている真空領域を活かしてマイクロ波を送信・受信するためのマイクロ波

ホーンアンテナアレイを設置した。真空容器内に設置することで真空ポートに制限されずにアンテナをアレイ化させることができ、また近接させることで不要な反射成分を減らしてプラズマ中のカットオフ層からの反射波が主な信号を取得することができた。ヘテロダイン検波により、波動に伴う MHz 帯の高周波揺動成分に対して、反射波に含まれる振幅・位相成分を分離することができ、密度揺動強度の絶対値評価が可能になった。AIC 波動に伴う密度揺動は背景プラズマ密度の 10^{-3} - 10^{-4} であった。

反射計を 2 台用いてプラズマ中の空間 2 点で同時計測を実施した。振幅・位相分離を行わないホモダイン検波では、プラズマ中に存在する波動の周波数成分においても二つの信号間のコヒーレンスは低い傾向にあった。ヘテロダイン検波により分離された振幅揺動成分は、コヒーレンスが統計ノイズレベル以下であり、位相差は完全にランダムであった。一方、分離された位相成分では 1 に近い高いコヒーレンスが得られた。反射計の原理として、密度とマイクロ波周波数で決まるカットオフ密度層の変動は基本的には位相成分に受かる。また、AIC 波動や加熱に用いている ICRF 波動はその波長が装置サイズスケールであり、境界条件で決まるグローバルな構造をしているはずである。従って、これら波動に伴う密度揺動を精度よく測れていた場合、空間的に離れた 2 点であっても高いコヒーレンスが期待され、また有意な位相差が測れるはずである。測定結果としては、磁力線方向に 1 m 離れても高いコヒーレンスが得られ、径方向には、内側領域で多少コヒーレンスが低下したが、統計ノイズレベル以上であった。内側を計るほどカットオフ層が小さくなり、不要なパスを通る反射成分が増えることと、反射波の強度が低下することが関係していると考えられる。以上のことから、開発した 2ch のマイクロ波反射計でのヘテロダイン検波により、プラズマ中の波動の空間構造を調べる上で有意な信号が得られること

が確認された。

真空容器内に拡充したホーンアンテナアレイを PIN ダイオードスイッチに接続し、さらに 2 台のマイクロ波反射計システムを別の PIN ダイオードスイッチで統合させた (図 2 参照)。PIN ダイオードスイッチの切替は TTL ロジック信号で制御でき、反射計のマイクロ波発振周波数を決めるための設定電圧と共に、一台のアナログ・デジタル出力デバイスでプログラムして制御できるようにした。2 台の反射計を接続する PIN スイッチにより、径方向 2 点同時、磁力線方向 2 点同時計測を切り替えて使用することができる。径方向 2 点同時計測では、同じアンテナから異なる周波数の二つのマイクロ波を入射させる。磁力線方向 2 点同時計測では、磁力線方向に離して設置されている二つのアンテナからほぼ同じ周波数のマイクロ波を入射させることで、同じ磁力線上の 2 点を計測することができる。この際、マイクロ波周波数に対してわずかな数十 MHz の差をつけることで、二つの反射計間での混信の影響を省くことができている。

磁力線方向 2 点同時計測と磁力線方向アンテナアレイを組み合わせた計測を様々な放電に対して行った。GAMMA 10 の 200 ms の放電中に、一つのアンテナを波動の位相の参照用に固定しながら、もう一つのアンテナを 0.2-1.0 ms 毎に周期的に切り替えた。これにより、各アンテナペア間の位相差の時間発展が同一放電において得られる。PIN スイッチ自体は μs より速く応答するが、周波数解析に必要な時間幅によりスイッチング速度を決定した。この測定により、AIC 波動が励起されて周波数が一定になる 20 ms 間の間に定在波になることがプラズマ中で初めて確認された。つまり、磁力線方向 2 点で計測した AIC 波動の位相差が有限の値から 0 か π へと発展した。さらにアンテナペアの違い、放電の違いにより、0 と π が変わる様子、さらには複数の AIC 波動間で同じアンテナペアでも同じ時間帯に 0 と π の違いがある場合が見出された。位相と同時に、振幅の絶対強度も AIC 波動の各ピーク周波数別に同定された。図 3 に各 AIC 波動毎に記号を変えて、密度揺動レベルの径方向分布と、その磁力線方向への変化の様子を示す。ほぼ同じ時間帯での磁力線方向 3 点での径方向分布は概ね全ての AIC 波動ともに似た分布であるが、磁力線方向への強度の変化を比べた際に、波動間で異なる変化がみられる。複数励起される AIC 波動間での顕著な違いが初めて見出され、磁力線方向の境界条件が離散化に関係していることが示唆された。さらに、ICRF 加熱条件を様々に変え、また局所的にガスを入射してプラズマパラメータ分布を変えるような実験から、複数の AIC 波動間での異なる軸方向空間構造が明らかになった。

その他、反射計により揺動振幅を導出する際に密度分布の精度が重要であり、従来の多

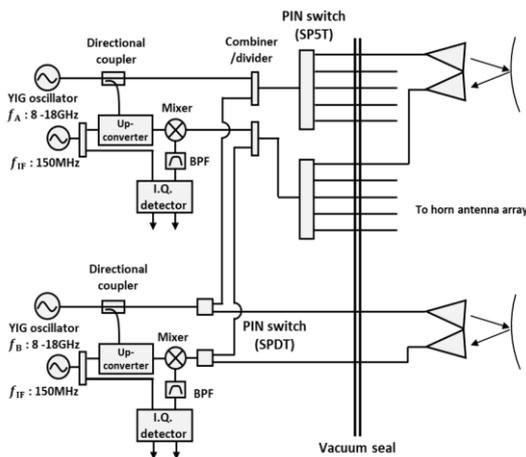


図 2 高速アンテナスイッチング 2ch マイクロ波反射計システムのブロック図

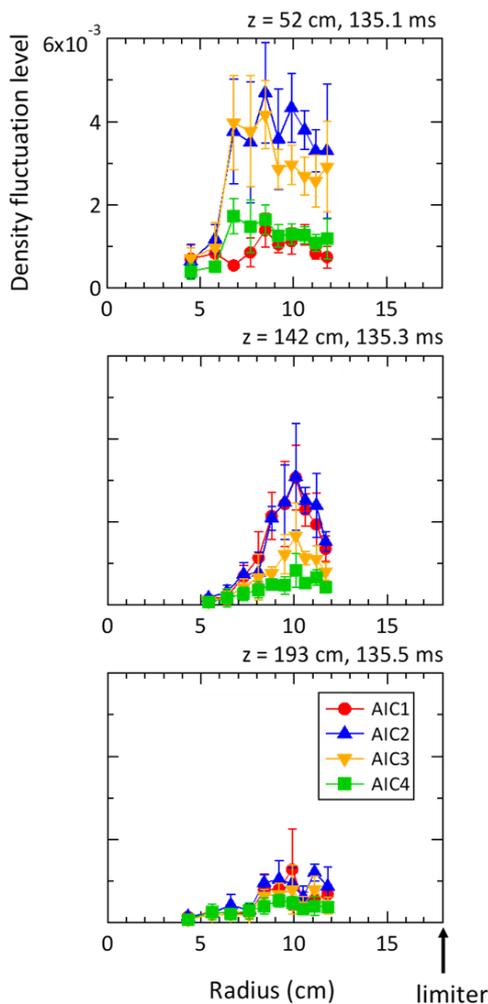


図3 AIC波動に伴う密度揺動レベルの径方向分布と磁力線方向への変化

視線干渉計による計測に加え、高速周波数掃引が可能なマイクロ波発振器を導入して FM 反射計による密度分布計測を可能にした。GAMMA 10 エンド部に高エネルギーイオン検出器を増設し、複数の AIC 波動の差周波数 (80-200kHz) の揺動と相互作用して磁力線方向に輸送されるイオンが、特に径方向内側で顕著であること、そのエネルギー帯は連続でなくあるエネルギー幅に限られること、差周波数毎にエネルギー帯が異なること等を明らかにした。その差周波揺動は AIC 波動間の非線形結合で生成されていることが、反射計データにバイスペクトル解析を適用することでわかり、さらに特に内側領域においてその生成が顕著であることがわかった。この特性は、装置エンド部で測定した高エネルギーイオンの特性と矛盾しない。従って、GAMMA 10 での非等方性緩和に対して、AIC 波動による直接のピッチ角散乱に加えて、この差周波揺動の寄与が示唆された。

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 10 件)

- ① R. Ikezoe, 他 14 名, Measurement of ICRF wave propagation using a microwave reflectometer with fast antenna switching on GAMMA 10, Journal of Instrumentation 12, C12017 (2017), DOI:10.1088/1748-0221/12/12/C12017, 査読有
- ② R. Ikezoe, 他 12 名, “Multi-point measurement using two-channel reflectometer with antenna switching for study of high-frequency fluctuations in GAMMA 10”, Rev. Sci. Instrum. 88, 033504 (2017), DOI:10.1063/1.4978323, 査読有
- ③ R. Ikezoe, 他 9 名, “Development of internal ICRF wave detection using microwave reflectometry on GAMMA 10”, AIP Conference Proceedings 1771, 050002 (2016), DOI:10.1063/1.4964196, 査読有
- ④ S. Jang, M. Ichimura, S. Sumida, M. Hirata, R. Ikezoe, 他 7 名, “ICRF heating in the plug/barrier region to control end-loss ions on GAMMA 10/PDX”, AIP Conference Proceedings 1771, 030011 (2016), DOI:10.1063/1.4964167, 査読有
- ⑤ M. Yoshikawa, R. Ikezoe, 他 12 名, “Direct Observation of Electron Heating by Electron Landau Damping of Alfvén Ion Cyclotron Waves Using Thomson Scattering System in the Tandem Mirror GAMMA 10/PDX”, Plasma Fusion Res. 11, 2402051 (2016), DOI: 10.1585/pfr.11.2402051, 査読有
- ⑥ R. Ikezoe, 他 12 名, “Wave excitation by nonlinear coupling among shear Alfvén waves in a mirror-confined plasma”, Phys. Plasmas 22, 090701 (2015), DOI:10.1063/1.4930216, 査読有
- ⑦ R. Ikezoe, 他 11 名, “Extension of Operational Regimes with ICRF Heating on GAMMA 10/PDX”, Fusion Science and Technology 68, 63-69 (2015), DOI:10.13182/FST14-853, 査読有
- ⑧ S. Sumida, M. Ichimura, T. Yokoyama, M. Hirata, R. Ikezoe, 他 11 名, “High-Density Plasma Production in the GAMMA 10 Central Cell with ICRF Heating on Both Anchor Cells”, Fusion Science and Technology 68, 136 (2015), DOI:10.13182/FST14-890, 査読有
- ⑨ T. Okada, R. Ikezoe, 他 10 名, “Internal Measurement of Propagation of ICRF Waves by Using Reflectometers on GAMMA 10”, Fusion Science and Technology 68, 161 (2015), DOI: 10.13182/FST14-898, 査読有

- ⑩ T. Yokoyama, M. Ichimura, A. Fukuyama, S. Sumida, M. Hirata, R. Ikezoe, 他 4 名, "Analysis of Wave Excitation of the Phase-Control ICRF Antennas with Three-Dimensional Full Wave Code on GAMMA 10", Fusion Science and Technology 68, 185 (2015), 査読有

[学会発表] (計 13 件)

- ① R. Ikezoe, 他 15 名, "Recent Studies Toward ICRF Heating of a High Density Linear Plasma on GAMMA 10/PDX", Japan-Korea Workshop on Physics and Technology of Heating and Current Drive in Fusion Plasmas", 27-28 February 2018, Institute of Advanced Energy, Kyoto University, Uji, Kyoto
- ② 池添竜也, 他 11 名, "GAMMA 10/PDX を用いた高密度直線プラズマのイオン加熱に向けた取り組み", Plasma Conference 2017, 2017. 11.20-24, 姫路商工会議所, 兵庫県, 22P-49
- ③ R. Ikezoe, 他 11 名, "ICRF heating based approach for production of a linear plasma with high ion temperature", 6th International Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion Research (PMIF2017), Tsukuba, Japan, 1-3 November 2017
- ④ R. Ikezoe, 他 11 名, "Studies on ion heating of the GAMMA 10/PDX plasma in a higher density regime toward a future divertor simulating linear device", 59th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, 23-27 October 2017, Milwaukee, Wisconsin, USA, PP11.00139
- ⑤ R. Ikezoe, 他 14 名, "Measurement of ICRF wave propagation using a microwave reflectometer with fast antenna switching on GAMMA 10", 18th International symposium on Laser-Aided Plasma Diagnostics, 24-28 September 2017, Prague, Czech
- ⑥ 池添竜也, 他 9 名, "GAMMA 10/PDX における高速イオンの軸方向輸送解明に向けた波動計測の高度化", 仙台プラズマフォーラム『プラズマ流の基礎と応用に関する研究会』電気通信研究所共同プロジェクト研究会『プラズマ流中マルチスケール構造形成による新規反応場の開拓に関する研究会』, 2017. 3. 2-3, 東北大学工学研究科
- ⑦ 池添竜也, 他 11 名, "アンテナスイッチングを用いた反射計による多点 ICRF 波動計測", 第 6 回 ICRF 研究会「ICRF 加熱装置の高性能化と将来応用」, 2016. 12. 27, 核融合科学研究所
- ⑧ 池添竜也, 他 11 名, "アンテナスイッチングを用いた反射計による高温プラズマ内部アルベン波動の径方向と磁力線方向の構造計測", 第 33 回プラズマ・核融合学会年会, 2016. 11.29-12. 2, 東北大学青葉山キャンパス, 30pP46
- ⑨ R. Ikezoe, 他 11 名, "Probing of high-frequency coherent fluctuations by using a two-channel microwave reflectometer with antenna switching", 58th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, San Jose, USA, 31 October - 4 November 2016, CP10.00168
- ⑩ R. Ikezoe, 他 10 名, "Spatial Structure of Spontaneously Excited ICRF Waves and Relevant High-Energy Ion Loss in the GAMMA 10 Tandem Mirror", 26th IAEA Fusion Energy Conference, Kyoto, Japan, 17-22 October 2016, EX/P8-43
- ⑪ R. Ikezoe, 他 9 名, "Development of internal ICRF wave detection using microwave reflectometry on GAMMA 10", 11th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, 8-12 August 2016, Novosibirsk, Russia
- ⑫ 池添竜也, 他 14 名, "GAMMA10 高温プラズマ中のアルベン波動の 2 点相関", 第 32 回プラズマ・核融合学会年会, 2015. 11. 24-27, 名古屋大学東山キャンパス 豊田講堂, 24aE11P
- ⑬ R. Ikezoe, 他 12 名, "Excitation of low-frequency waves via coupling between slow Alfvén waves in the GAMMA 10 tandem mirror", 57th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, 2015. 11. 16-20, Savannah, US, NP12.00042

[その他]

ホームページ:

<https://www.prc.tsukuba.ac.jp/wp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

池添 竜也 (IKEZOE, Ryuya)

筑波大学・数理物質系・助教

研究者番号: 7 0 5 8 2 8 4 9