

## 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 25 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21540506

研究課題名（和文） イオンサイクロトロン周波数帯波動のパラメトリック減衰に関する研究

研究課題名（英文） Study on parametric decay of ion cyclotron range of frequency waves

研究代表者

市村 真（ICHIMURA MAKOTO）

筑波大学・数理物質系・教授

研究者番号：10151482

研究成果の概要（和文）：高温・高密度プラズマ中で、プラズマ生成・加熱のため外部より励起する ICRF 波動と加熱の結果としての温度非等方性に起因してプラズマ中に自発励起される ICRF 波動について、波動間相互作用に関する実験的な研究を行った。波動の空間構造に着目し、周辺部に設置されている磁気プローブによる磁場揺動測定とプラズマ内部のマイクロ波反射計による密度揺動計測から波動間の結合や分岐を明らかとし、また、これらの波動が高エネルギーイオンに及ぼす影響について明らかとした。

研究成果の概要（英文）：Experimental studies on wave-wave interactions between applied ICRF waves and spontaneously excited waves have been performed with magnetic probes and reflectometers. The coupling and/or decay of the waves are clearly observed in the magnetic mirror field configuration. Wave-particle interactions have been also discussed by using high-energy ion detectors installed in both perpendicular and parallel directions to the magnetic field line.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010 年度	900,000	270,000	1,170,000
2011 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学

キーワード：波動、イオンサイクロトロン周波数、パラメトリック減衰、AIC 波動、  
波動間の相互作用、波動一粒子間の相互作用

## 1. 研究開始当初の背景

(1) プラズマ生成・加熱等の目的で外部から励起するアルベン波動に関しては、国内外において、基礎実験を含めて多くの研究が行われている。一方、速度分布のゆがみに起因して高温プラズマ中に自発的に励起されるアルベン波動に関しては、最近の大型装置にお

けるトロイダルアルベン固有モード（TAE）等の研究が進展しているが、ICRF 領域の波動に関して、特に実験的研究が少ない。

(2) トロイダル系に特有の TAE モードを代表とするアルベン固有モードは有名であるが、広い定義でのアルベン固有モードのなかには、回転変換のない直線プラズマで不安定

になる固有モードの存在が指摘されている。また、タンデムミラー装置 GAMMA10 セントラル部では、ICRF 領域の印加高周波波動と自発的に励起される AIC 波動とが結合、分岐をしながら伝搬することが計測されているが、低周波数領域に ICRF 波動から AIC 波動との分岐として観測される波動が、これまでに報告されていないミラー磁場中でのアルベン固有モードの可能性があり、詳細な計測が必要である。また、この低周波数波動と高エネルギーイオンとの相互作用の解明は高ベータプラズマ閉じ込め研究に不可欠である。

(3) 磁気圏プラズマで観測される温度非等方度の上限と AIC 波動との関連を実験室で模擬する実験が米国で報告されている。しかし、磁気圏に見られる無衝突高ベータプラズマを基礎実験装置で実現することは容易ではなく、明瞭な実験結果が得られているとは言い難い。GAMMA10 セントラル部では、高ベータプラズマ (数%) が容易に形成され、先に述べた AIC 波動が容易に励起され実験的に観測されている。実験室プラズマを用いた磁気圏プラズマ模擬実験の一つの例として挙げるができる。

## 2. 研究の目的

高温・高密度プラズマ中において、イオンサイクロトロン周波数帯 (ICRF) でのプラズマの生成・加熱のため外部より励起する ICRF 波動、また、パルクイオンの速度分布関数テイル部への高エネルギーイオンの重畳 (Bump on tail) や温度の非等方性に起因してプラズマ中に自発励起される波動を統一的に理解し、イオンとの相互作用や波動間の分岐・結合を解明することを全体の目的としている。本研究では、加熱に用いられる ICRF 波動が、自発励起波動であるアルベンイオンサイクロトロン (AIC) 波動とグローバルアルベン固有モード (GAE) に分岐することを実験的に明らかとする。また、これらの波動と高エネルギーイオンとの相互作用にも着目し、実験的に観測される高エネルギーイオンの輸送を明らかとする。

## 3. 研究の方法

加熱用 ICRF の周波数と AIC 波動の周波数との差周波数を持ち 1MHz 以下に観測される低周波数揺動の空間構造の詳細を計測する。この差周波数磁場揺動は、イオン加熱が飽和、または、劣化する領域で急激にその強度が増大することから、印加した加熱高周波波動が AIC 波動とこの低周波数揺動に直接分岐することがその要因の一つであると考えられる。また、この低周波数揺動に加えて、離散的周波数ピークを持つ AIC 波動同士の差周波数揺動は、磁力線に沿って装置端部か

ら流出する高エネルギーイオン信号にも観測されており、微視的不安定性である AIC 波動による高エネルギーイオンのピッチ角散乱を示している。AIC 波動によるエンド部への粒子輸送の解明は、磁力線に沿った方向への粒子加速等の重要な知見を含んでいる。

## 4. 研究成果

これまでは、磁気プローブを用いたプラズマ周辺部での波動測定が行われてきたが、波動の空間構造を含めて波動間の相互作用の詳細を明らかとするためにはプラズマ内部での情報が不可欠である。このことから、本研究課題では、マイクロ波反射計を導入し、プラズマ内部の密度揺動計測を実施した。電磁波動による密度揺動に関しては、理論的な検討があり、これまでも測定されているが、波動間の結合や分岐に関する詳細な報告はなされていない。図 1 は、プラズマ内部における密度揺動の周波数スペクトルの時間変化を、その強度を色の濃淡で表している。プラズマ生成に用いられる ICRF 波動 (RF1-East&West)、イオン加熱に用いる ICRF 波動 (RF2)、AIC 波動、ICRF 波動と AIC 波動との結合 (RF2+AIC) と分岐 (RF2-AIC) が計測されている。プラズマ内部の密度揺動としてこれらの波動間の相互作用が検出されたのは初めてである。ここでは、加熱のために入射する RF2 と離散的周波数ピークを持つ AIC 波動との差周波数の低周波数領域に励起される波動 (RF2-AIC) に着目した。1MHz 以下のところに AIC 波動の離散的ピークに対応する数本の差周波数揺動が観測されていることが分かる。図 2 は、実験で観測され

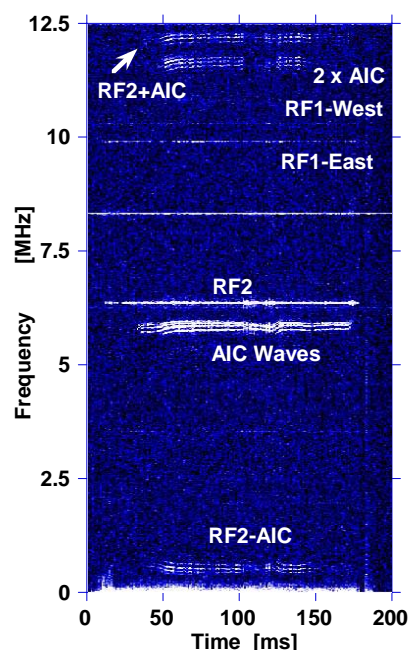


図 1 反射計によるプラズマ内部密度揺動の周波数スペクトルの時間発展

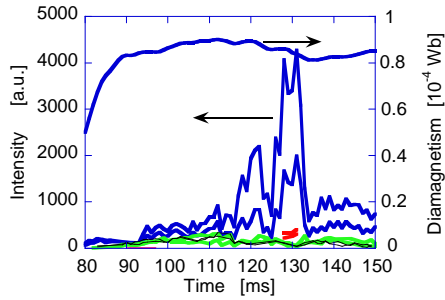


図 2 セントラル部反磁性量と低周波数密度揺動強度の時間発展

た反磁性量と低周波数揺動の強度の時間変化を示している。反磁性量が増大し、ほぼ定常に達するところから強く励起されていることがわかる。数本存在する線は、離散する其々の周波数ピークに対応している。離散するピークによってその強度は大きく異なり、反磁性量がわずかに減少する時間帯で特に強く励起される周波数ピークがあることがわかる。加熱に用いられる高周波電力が直接 AIC 波動と低周波波動へと分岐する可能性を考えて、パラメトリック崩壊の条件について、以下で考察を行った。セントラル部中央面付近には、 $45^\circ$  の角度で 2 本の磁気プローブが設置されている。図 3 に方位角方向 2 本の磁気プローブ信号の位相差から推定した方位角方向のモード数と周波数の関係を示した。図 3(a) は、印加高周波 (RF2) と AIC 波動の方位角モード数を示している。磁気プローブとアンテナ間にはイオンサイクロトロン共鳴層が存在し、加熱に寄与するアルベン遅波は、共鳴層を越えて伝播できず、共鳴を持たない速波  $m=+2$  が検出されていると考え

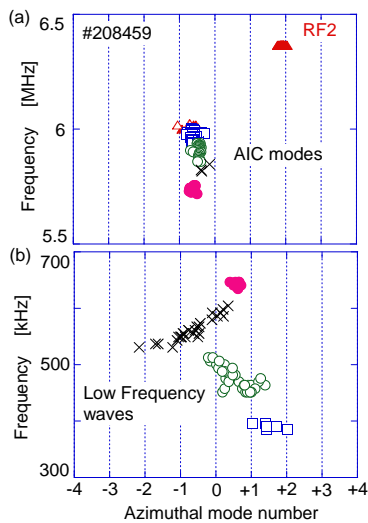


図 3(a) 印加高周波と AIC 波動の方位角方向モード数と (b) 低周波数揺動の方位角方向モード数

られる。ここでは、方位角方向モード数正の方向を電子サイクロトロン運動の方向と定義しており、右回りのアルベン速波が検出されている。AIC 波動に関しては、これまでと同じ、離散するピークによらずに  $m=1$  付近に観測される。図 3(b) は、差周波数揺動のモード数を示している。図中の各シンボルは、図 3(a) の印加高周波と AIC 波動の各差周波数に対応している。図 3 に示したように、AIC 波動の周波数は時間とともにプラズマパラメタに依存して高い周波数側にシフトしている。一方、対応する差周波数揺動は、時間とともにその周波数が低い周波数側にシフトする。顕著な観測結果として、離散的ピークに対応するそれぞれの差周波数揺動の方位角方向のモード数が時間とともに、また、その変化するモードは離散するピークによって異なることが明らかとなった。時間とともにモードが変化することは、幾つかの異なる方位角モード数を持った波動が共存し、その相対的強度を変化させながら励起されていることを表している。

図 4 に同一磁力線上に設置された磁気プローブ信号間の位相差を示した。これまでの研究から、AIC 波動は、プラズマ圧力が最も大きなセントラル部中央付近で励起され両ミラースロート方向に伝播することがわかっている。また、その磁力線方向の構造は、セントラル部中央付近で定在波を形成し、プラズマパラメタの上昇とともに定在波の領域が磁力線方向に拡大していくことが実験的に観測されている。印加高周波である 6.36 MHz の波動は、セントラル部の東西両端部の 2 つのアンテナから励起されるため、2 つのアンテナ間では定在波となる。磁力線方向の定在波領域内に設置された 2 本の磁気プ

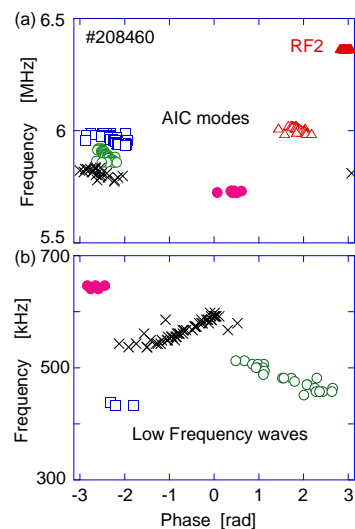


図 4(a) 印加高周波と AIC 波動の磁力線方向位相差と (b) 低周波数揺動の磁力線方向位相差

ローブで計測すると、その位相差は定在波の波長に依存して0または $\pi$ で計測される。図4(a)には、印加周波数(RF2)の位相差が $\pi$ で観測されていることが示されている。AIC波動に関しては、周波数の最も高いモードを除き、0または $\pi$ 付近に計測されている。一方、図4(b)に示されている差周波数揺動の磁力線方向の構造は、プラズマパラメタの変化に伴い、その位相差が大きく変化することが明らかとなった。

AIC波動やRF2との差周波数を持つ低周波数揺動がプラズマ全体で励起されている固有モードであることは、プラズマ内部の密度揺動と周辺部の磁気プローブにおいて強い相関を持つことから明らかであるが、その境界条件に関してはまだ完全に理解できたとは言えない。プラズマ中の揺動に関して、磁力線方向の2点同時計測等の再現性に左右されない方法により、詳細な構造を解析することが今後の課題となる。

GAMMA10装置においては、簡便な半導体検出器を用いて磁力線に沿った方向と磁力線に垂直方向へ輸送される高エネルギーイオンを計測している。これまでに、プラズマ中に励起されるドリフト波やフルート揺動により、高エネルギーイオンが径方向輸送されることを報告した。温度非等方性に起因して自発励起されるAIC波動は、磁気圏プラズマにおいても観測される共通の物理現象であるが、実験室系で観測できる装置はGAMMA10が唯一である。理論的には、AIC波動が速度空間でのイオンのピッチ角散乱を引き起こし、磁力線方向に高エネルギーイオンを輸送することが指摘されている。本課題では、磁力線方向に輸送される高エネルギーイオン信号上にAIC波動の各周波数ピーク間の差周波数である低周波数揺動が観測されることを実験的に明らかとした。ICRF加熱を用いた磁力線方向のイオン加熱や加速は、開放端系での閉じ込め劣下を引き起こす反面、開放端部を利用したダイバータ模擬

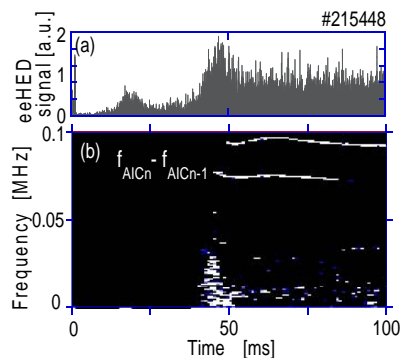


図5(a)エンド部に取り付けられた半導体検出器の信号と(b)その周波数スペクトルの時間発展

実験においては、高エネルギー粒子束制御に利用できる利点がある。定量的な評価に関しては本課題で議論していないが、今後重要な課題となると考えられる。図5(a)にエンド部に取り付けられた半導体検出器の信号の時間発展と図5(b)にその周波数スペクトルの時間発展を示した。周波数ピークの強度が色の濃淡で示してある。100kHz付近に観測される周波数ピークは、AIC波動の離散的周波数ピーク間の差周波数に相当することが明らかとなっている。AIC波動による高エネルギーイオンのピッチ角散乱を実験的に示す顕著な結果である。

## 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8件)

- ① R. Ikezoe, M. Ichimura, et al., “Measurement of spatiotemporal behavior of Alfvén-ion-cyclotron waves in the GAMMA10 tandem mirror”, Plasma Fusion Res. 6 (2011) 2402047. 査読有  
DOI: 10.1585 / pfr.6.2402047
- ② Y. Imai, M. Ichimura, et al., “Observation of the pitch angle distribution of high-energy ions and their radial transport in the central cell of GAMMA10”, Plasma Fusion Res. 6 (2011) 2402152. 査読有  
DOI: 10.1585 / pfr.6.2402152
- ③ M. Ichimura, Y. Yamaguchi, R. Ikezoe, et al., “Radial transport of high-energy ions due to low frequency fluctuations in the GAMMA 10 tandem mirror”, Fusion Science and Technology, Volume 59, 1T, 98 (2011). 査読有、  
[http://www.new.ans.org/pubs/journals/fst/a\\_11583](http://www.new.ans.org/pubs/journals/fst/a_11583)
- ④ Y. Yamaguchi, M. Ichimura, et al. “Three-Dimensional Analysis of ICRF Wave Excitation on the GAMMA 10 Central Cell”, J. Plasma Fusion Res. SERIES, Vol. 9 (2010), 23-28. 査読有  
[http://www.jspf.or.jp/JPFERS/index\\_vol9.html](http://www.jspf.or.jp/JPFERS/index_vol9.html)
- ⑤ M. Ichimura, Y. Yamaguchi, et al., “Parametric Excitation of Low Frequency waves in ICRF-Produced Plasmas on GAMMA 10”, J. Plasma Fusion Res. SERIES, Vol. 8 (2009), 893-896. 査読有  
[http://www.jspf.or.jp/JPFERS/index\\_vol8-5.html](http://www.jspf.or.jp/JPFERS/index_vol8-5.html)

[学会発表] (計 27 件)

- ① 市村真、「ミラー磁場配位中の ICRF 加熱と高エネルギーイオンの振舞」、日本物理学会第 67 回年次大会、関西学院大学、2012.3.26 (招待講演)
- ② 市村真、他、「GAMMA 10における高エネルギーイオンの高周波および低周波揺動との相互作用」、Plasma Conference 2011、石川県立音楽堂、2011.11.24.
- ③ 佐藤達典、池添竜也、市村真、他、「GAMMA 10 におけるマイクロ波反射計を用いた高周波密度揺動の測定」Plasma Conference 2011、石川県立音楽堂、2011.11.24.
- ④ 池添竜也、市村真、他、「GAMMA10 における温度非等方性が駆動する ICRF 波動のプラズマ内部領域における挙動」、Plasma Conference 2011、石川県立音楽堂、2011.11.24.
- ⑤ 池添竜也、市村真、他「GAMMA10 中に励起された Alfvén-ion-cyclotron 波動の時空間発展の計測」、第 27 回プラズマ核融合学会、北海道、2010.11.30.
- ⑥ M.Ichimura, Y.Yamaguchi, et al., “Spontaneously excited waves in the ion cyclotron range of frequency on fusion devices”, 2009 International Workshop on Frontiers In Space and Fusion Energy Sciences, Tainan (Taiwan), Nov.30-Dec.3 2009. (招待講演)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

市村 真 (ICHIMURA MAKOTO)  
筑波大学・数理物質系・教授  
研究者番号：10151482

### (2) 研究分担者

山口 裕資 (YAMAGUCHI YUUSUKE)  
筑波大学・プラズマ研究センター・研究員  
研究者番号：10466675  
(平成 21 年度)

### (3) 研究協力者

池添 竜也 (IKEZOE RYUYA)  
筑波大学・プラズマ研究センター・研究員  
研究者番号：70582849