# 斜め入射のイオンビームによるイオン - イオン不安 定性

**齋藤,和史** 九州大学大学院総合理工学研究科高エネルギー物質科学専攻

中村, 良治 九州大学大学院総合理工学研究科高エネルギー物質科学専攻

**河合, 良信** 九州大学大学院総合理工学研究科高エネルギー物質科学専攻

https://doi.org/10.15017/17297

出版情報:九州大学大学院総合理工学報告.15(1), pp.23-28, 1993-06-01.九州大学大学院総合理工学 研究科 バージョン:

権利関係:

# 斜め入射のイオンビームによるイオンーイオン不安定性

齋藤和 史\*・中村良治\*\*・河合良信\*\*\* (平成5年2月26日受理)

# Experiment on Ion-Ion Instabilities Excited by Oblique Ion Beam Injection

Yoshifumi SAITOU\*, Yoshiharu NAKAMURA\*\*, and Yoshinobu KAWAI\*\*\*

An ion beam which is inclined about 70 degrees against the plasma axis is injected into plasmas. This ion beam exists all over the experimental region except within the distance about 2 cm close to the separation grid. It is confirmed by the interferential method that observed instabilities are the ion-ion instability. The amplitude of the instability grows near the separation grid, and gradually damps. When the ion beam is pertubed by an external RF field, the growth rate and the damping rate change from the ones without the external RF field. Especially, it is found that when the frequency of the external RF field is 500kHz, the growth rate and damping rate change remarkably.

#### 1序 論

従来のビームプラズマ系における実験では, 波の伝 播方向とビームの伝播方向が平行であるものが主であ った.<sup>1-19)</sup>イオンビームプラズマ系において3次元的 な空間構造を考慮した研究はいくつかある. Doveil ら<sup>20)</sup>は,イオンビームが位相空間における拡散によっ て入射ビームに対してある角度を持った方向に伝播す る成分が生じ,斜め方向にも不安定性が成長すること を報告している.その3次元の系では,イオンビーム の斜め成分が不安定性の励起条件を満たせば良いため, 1次元の系よりも速いイオンビームの速度領域で系が 不安定になる.

本論文では、波の伝播方向とビームの伝播方向に角 度を持たせて入射することによって不安定性を励起し、 外場による抑制の実験を行った結果を示す.特に、外 場の周波数を変化させたときの不安定性の成長・減衰 の振る舞いを詳しく調べた.本実験ではイオンビーム 源がターゲットプラズマに比べて小さいために、ビー ム源の周辺部でイオンビームか3次元的な広がりを持 つことが考えらる. 本実験においても、イオンビームのイオン波の伝播 方向への射影成分 V<sub>b</sub> cos θ (θ はビームと波の伝播方 向がなす角度)が系を不安定にする条件、例えばイオ ンーイオン不安定性の励起条件を満たせば不安定にな ると予想さるので、ビームと波が平行に伝播する場合 に比べてより大きな速度のビームで系が不安定になる ことが期待される.ここでは、イオン波の空間的な成 長及び減衰についてはプラズマの軸方向のみについて 測定し、イオンビームのエネルギー分布関数について はイオンビームの入射方向のみについて測定すること で十分である.

2節ではダブルプラズマ装置を改造した実験装置に ついて述べる.3節では,斜めにイオンビームを入射 したときに観測される不安定性と外場の相互作用に関 する初歩的な実験結果について述べる.4節では得ら れた実験結果,特に不安定性の成長・減衰の,外場の 周波数依存性について詳しく考察する.5節では実験 結果についてまとめる.

#### 2. 実験装置

実験装置の概念図を Fig.1 に示す. この DP 装置 は, 直径約 100cm, 長さ約 200cmで, ドライバー (D) とターゲット(T) それぞれの円周上に48本と43 本, 合計91本の熱陰極フィラメントが張ってある. 通

高エネルギー物質科学専攻博士後期課程

<sup>\*\*</sup>宇宙科学研究所

<sup>\*\*\*</sup>高エネルギー物質科学専攻



Fig. 1 Experimental apparatus for the oblique ion beam experiment.

常の DP 装置と異なり、ターゲット側に図中に S で 示した一辺が約 24cm の立方体の小型の永久磁石の枠 (ステンレス製のパイプに封入)が固定されている. 永久磁石は、マルチダイポールカスプミラーを形成し ている.S内にはフィラメントは挿入されておらず. S内のプラズマは、ターゲットプラズマ中のプライマ リー電子の高エネルギー成分がS前面のメッシュ (50メッシュ/インチ)を通過して S内部に侵入し, そこで中性アルゴン原子を衝突電離することによって 生成される.そうして生成されたプラズマが、V.に よって加速され、イオンビームとしてターゲットプラ ズマ中に入射される. Sの周囲は絶縁体で被覆されて おり、Vss がターゲットプラズマに影響を及ぼすこと の無いようになっている. イオンビームは、イオン波 の伝播方向であるプラズマの軸と約70°の角度を持っ ており、Sに接続されている発振器によって振幅 A. 周波数 f, で外場を印加することができる.

測定には、前章までと同様に直径 6mm の平板型 Langmuir プローブと、直径約 1.5cm の静電型エネル ギーアナライザーを用いた. Langmuir プローブは干 渉法によってイオン波の空間波形を測定するために波 の伝播方向を向いており、静電型エネルギーアナライ ザーは、イオンビームのエネルギー分布を測定するた めにビームの入射方向を向いている.

#### 3. 実験結果

#### 3.1 実験条件とプラズマパラメータ

真空容器は基底圧力が~3×10<sup>-7</sup> Torr まで排気さ

れた.実験にはアルゴンガスを  $2 \times 10^{-4}$  Torr で用いた. プラズマパラメータは,電子温度 1.3eV,電子密度  $4 \times 10^8 \text{cm}^{-3}$  ( $f_{pi}$ =660kHz),イオンビームの密度  $n_b/n_i \simeq 0.03$  である.ここでは,励起するイオン波の 周波数  $f_0$ =150kHz,発振器の振幅  $V_i \simeq 20$ mV,イオンビームのエネルギー  $V_{ss}$ =8eV に固定し,イオンビームに印加する外場の周波数  $f_b$  及び,外場の振幅  $A_b$  を変化させて実験を行う.

#### 3.2 イオンビーム領域とイオン波の減衰と成長

まず、イオンビームを入射しないでイオン波を励起 した. Fig. 2(a) は、周波数が 150kHz の場合の干渉波 形で、セパーレーショングリッドからプラズマの軸方 向に約 3cm 離れたところでイオン波はほぼ完全に減 衰する. 次に  $V_{ss}$ =8eV のイオンビームを斜めに入射 すると、干渉波形は Fig. 2(b) のように、いったん減 衰したイオン波がセパーレーショングリットから約 8cm で再び成長を始める. 即ち、系が不安定性にな る. セパーレーショングリッドから約 2 cmまでの減衰 している領域は(ビームの端で若干広がる分を除い て)イオンビームが存在しない領域であり、それより もセパーレーショングリッドから離れた、イオン波が 再び成長を始める領域は、測定領域全体にイオンビー ムが存在する.

印加する外場の振幅が大きくなると、成長していた 波が成長しなくなる.即ち、不安定性が抑制される.



Fig. 2 Typical wave patterns of the ion wave at frequency 150 kHz, where the ion beam is not injected (a) and is injected (b).



Fig. 3 Distinction of growing and/of damping region. The figures denoted by A, B, and C represent the region 1, the region 2, and the region 3, respectively.

ここで,イオン波を成長率・減衰率によって Fig. 3 のように空間的に三つの領域に分ける.即ち,

- 領域1:イオン波が減衰している領域
- 領域2:イオン波の減衰率が領域1よりも小さいか, または、成長している領域
- 領域3:イオン波が再び(やや大きめの減衰率で) 減衰している領域
- イオンビームは領域2よりも後方に存在する.
- 3.3 領域1の減衰率

まず初めに、イオンビームの存在しない領域1にお けるイオン波の減衰率について、外場の周波数毎の外 場の振幅に対する依存性を調べる. Fig. 4 に典型的な 例として  $f_b$  が 300kHz の場合 (a) と 500kHz の場合 (b) の結果を示す. 外場の周波数  $f_b$  が 500kHz の場 合を除いて、外場の振幅  $A_b$  が大きくなっても波の減 衰率はほぼ一定のままである.  $f_b$ =500kHz の場合に は、 $A_b$  が大きくなるにつれて波の減衰率が大きくな る傾向にあることがわかる.

#### 3.4 領域2の成長率と減衰率

イオンビームが入射されている領域2では, 減衰し ていた波が成長を始め, 不安定性が励起される.本実 験ではイオン波に対してイオンビームが角度を持って 伝播しているので, 測定したい方向の成分のみへのイ オンビームの寄与を正確に評価することは非常に困難 である.しかしながら, イオンビームの速度をイオン 波の伝播方向へ射影した速度を V<sub>6</sub>, イオン音波の速 度を C<sub>5</sub>とすると V<sub>6</sub>/C<sub>5</sub>=2となり, この条件がイオン ーイオン不安定性が励起される条件と一致する.また, 実験で得られた分散関係がイオンーイオン不安定性の 分散関係とほぼ一致する.従って, 観測された不



 $A_b(V)$ 

Fig. 4 Damping rates of the ion wave in the region 1 versus the amplitude of the external RF field. Here, the frequency of the external RF field is 300 kHz (a) and 500kHz (b), respectively.

安定性はイオンーイオン不安定性であると考えられる. この不安定性はイオンビームに外場を印加すること によって抑制される.このときの外場の振幅に対する 波の成長率の変化を典型例を Fig. 4 の場合と同様に Fig. 5 に示す.この場合には、何れの  $f_b$  においても  $A_b$  の増加と共に成長率が小さくなっている.とりわ け、 $f_b$ =500kHz の場合に変化が著しく、 $A_b$ =4V では 波は減衰するようになっている.





Fig. 5 Growth and /or damping rates of the instability in the region 2 versus the amplitude of the external RF field, where the frequency of the external RF field is 300 kHz (a) and 500 kHz (b), respectively.

### 3.5 領域3の減衰率

いったん成長を始めて不安定になった波は、セパー レーショングリットから約 12cm 離れたところから再 び減衰を始める.減衰率の外場の振幅に対する典型的 な変化を Fig. 4 と5と同様に Fig. 6 に示す. この領 域でも、やはり  $f_b$ =500kHz の場合に  $A_b$  が大きくな ったときの波の減衰率が著しく大きくなっていること がわかる.



Fig. 6 Damping rates of the instability in the region 3 versus the amplitude of the external RF field, where the frequency of the external RF field is 300 kHz (a) and 500 kHz (b), respectively.

## 3.6 イオンビームのエネルギー分布関数

2.節でも述べたように、本実験においてはイオン ビームの密度が非常に小さく、エネルギー分布関数の 変化を調べるには至っていないが、イオンビームのエ ネルギー分布関数のピークは比較的容易に識別できた そこで、イオンビームに印加した外場の振幅とイオン ビームのエネルギー(時間分解をしていない場合の分 布関数のピーク)の関係を調べた結果, $f_b = 500 \text{kHz}$  以外は、 $A_b$ が増加してもイオンビームのエネルギー はほほ 7eV のままで変化しないことがわかった. 一 方、 $f_b = 500$ kHz の場合、2つのイオンビームのピー クが現れる.

#### 4. 考 察

3節で見たように、斜めにイオンビームを入射した 場合に、 $f_b$ =500kHz 近傍において他の $f_b$  の場合と異 なった外場の振幅  $A_b$  依存性を示している. この実験 では、イオンプラズマ周波数が 660kHz であるので、 イオンプラズマ周波数の影響が最も考え易いように思 われる. もちろん、 $f_{pi} = 660$ kHz であれば、 $f_b =$ 700kHz の場合にもここで示した以上の変化が現れて も良いように思われるが、その場合にはイオンはもは や外場に追従できなくなっており、 $f_b =$ 500kHz のと きほど大きな変化が現れなかったと予想される.

f<sub>b</sub>=500kHz 以外の場合には、イオンビームのエネ ルギーは外場の振幅 A, の影響をほとんど受けていな い.  $f_{s} = 500 \text{kHz}$ の場合に2つのピークが現れるのは, 次のような理由によると考えられる. 即ち、イオン ビームに正弦波の外場を印加するとき、イオンビーム は外場による振動のピーク近傍のエネルギーを感じて いる時間が相対的に長くなる.例えば振幅が1の正弦 波で、振幅が0.9以上となっている時間は1周期のほ ぼ30%である.振幅が0.8以上とすれば、それはほぼ 40%となる. その結果, エネルギーアナライザー時間 的に平均したイオンビームのエネルギー分布に2つの ピークが現れるのであろう. そこで,  $f_{\rm s}$ =500kHz と して A, を変化させ、現れる2つのピークが現れるで あろう. そこで,  $f_{\mu}$ =500kHz として  $A_{\mu}$ を変化させ, 現れる2つのピーク間のエネルギー差δを調べる、δ が、外場の振幅 A, との間にδ∝A, という関係がある ことが期待される.外場の振幅 Ab がイオンビームの エネルギー 7eV 以下で2つのピークのエネルギー差 が外場の振幅に比例して変化することが明らかとなっ た. イオンビームのエネルギーの2つのピークの差δ はδ∝0.3 A, で表される. 比例係数が1となってい ない原因として現時点では、イオンビームの密度が小 さいため S/N 比が悪いことなどが考えられる. しか しながら、外場の振幅がイオンビームのエネルギー以 下の場合にはδと A, が比例関係にあることがわかっ た.

以上のような結果から、この斜めビームの実験にお

いて,不安定性の成長・減衰の外場の周波数依存性は イオンプラズマ周波数が大きく影響していると予想さ れる.

#### 5. ま と め

イオンビームを斜めに入射し、イオンビームの伝播 方向とは異なった方向に成長するイオンーイオン不安 定性を励起して外場による抑制実験を行った.それに よって次のような結果を得た.まず、イオンビームを 斜めに入射することによってもイオンーイオン不安定 性が励起された.イオンビームに外場を印加すると励 起されたイオンーイオン不安定性は抑制された.イオ ンビームに印加した外場の周波数 f<sub>b</sub> が500kHz のとき の不安定性の振舞いは、それ以外の周波数の場合とは 著しく異なっており、特に、セパーレーショングリッ ドから遠方でイオン波の減衰する領域3におけるイオ ン波の減衰が大きくなった.

イオンビームに印加した外場の周波数 f<sub>b</sub> が 500kHz のときに、イオンビームのエネルギー分布関数に2つ のピークが現れた.この2つのピーク間のエネルギー 差と外場の振幅との間にはδ∝0.3A<sub>p</sub>の関係が成り立 つ.この実験におけるイオンプラズマ周波数は 660kHz であり、イオン波の成長率・減衰率が大きく 変化する周波数やイオンビームのエネルギー分布関数 がピークが2つに分離することなどは、イオンプラズ マ周波数における共鳴的な効果が影響していることが 予想される.

#### 参考文献

- 1) B. E. Keen and W. H. W. Fletcher: Phys. Rev. Lett., 23, 760 (1969).
- 2) B. E. Keen and W. H. W. Fletcher: J. Phys., D 3, 1868 (1970).
- 3) B. E. Keen and W. H. W. Fletcher: Phys. Rev. Lett., 24, 130 (1970).
- 4) B. E. Keen and W. H. W. Fletcher: J. Phys., D 6, 1684 (1973).
- 5) Y. Nakamura: J. Phys. Soc. Jpn., 28, 1315 (1970).
- 6) Y. Nakamura: J. Phys. Soc. Jpn., 31, 273 (1971).
- 7) E. Okutu, Y. Nomura, and Y. Nakamura: Phys. Lett., **72AA**, 229 (1979).
- Y. Nishida, M. Tanibayashi, and K. Ishii: Phys. Rev. Lett., 24, 1001 (1970).
- Y. Nishida, M. Tanibayashi, and K. Ishii: AIP Conf. Proc., 255 (American Institute of Physics, New York, 1970).

- 10) K. Odajima, Y. Nishida, and Y. Hatta: Phys. Fluids, 17, 1631 (1974).
- 11) O. Fukumasa, T. Obiki, and R. Itatani: J. Phys. Soc. Jpn., 33, 1730 (1972).
- 12) O. Fukumasa, and R. Itatani: J. Phys. Soc. Jpn., **42**, 357 (1977).
- 13) O. Fukumasa, and R. Itatani: Phys. Lett., 68A 59 (1978).
- 14) R. W. Boswell, P. Christiansen, and C. R. Salter: Phys. Let., **38A**, 67 (1972).
- 15) S. Aihara, and S. Takamura: Appl. Phys. Lett., 18, 375 (1971).

- 16) T. Fujita, T. Ohnuma, and S. Adachi: 電気学会プラズマ研 究会資料 EP-74-21 (1974).
- 17) 齋藤和史,上田和宏,田中雅慶,小森彰夫,河合良信: 総合理工学研究科報告,12,195 (九州大学,平成2年).
- 18) Y. Saitou, M. Tanaka, A. Komori, and Y. Kawai: J. Phys. Soc. Jpn., 59, 3739 (1991).
- Y. Saitou, Y. Nakamura, M. Tanaka, A. Komori, and Y. Kawai: in th. Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases, Pisa, 3, 621 (Institute of Atomic and Milecular Pgysics, 1991).
- 20)例えば
  - F. Doveil and D. Gresillon: Phy. Fluids, 18, 1756 (1975).