

## 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-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 perturbed 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が3次元的な広がりを持つことが考えられる。

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  $V_b \cos \theta$  ( $\theta$  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-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れるので、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、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

\*\*宇宙科学研究所

\*\*\*高エネルギー物質科学専攻

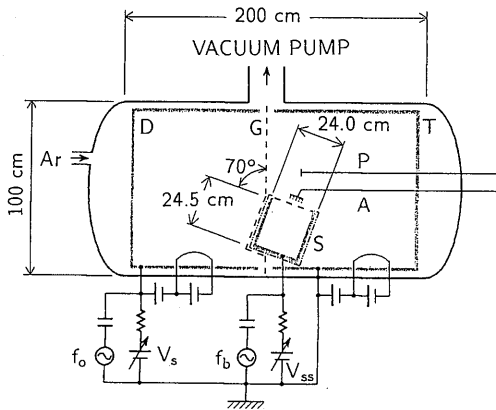


Fig. 1 Experimental apparatus for the oblique ion beam experiment.

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、 $V_{ss}$  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、 $V_{ss}$  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  $70^\circ$  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  $A_b$ 、周波数  $f_b$  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  $\sim 3 \times 10^{-7}$  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  $4 \times 10^8 \text{cm}^{-3}$  ( $f_{pe} = 660 \text{kHz}$ )、イオンビームの密度  $n_b/n_i \approx 0.03$  である。ここでは、励起するイオン波の周波数  $f_0 = 150 \text{kHz}$ 、発振器の振幅  $V_s \approx 20 \text{mV}$ 、イオンビームのエネルギー  $V_{ss} = 8 \text{eV}$  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  $V_{ss} = 8 \text{eV}$  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レーショングリッドから約 8cm で再び成長を始める。即ち、系が不安定性になる。セパレーショングリッドから約 2cm 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。

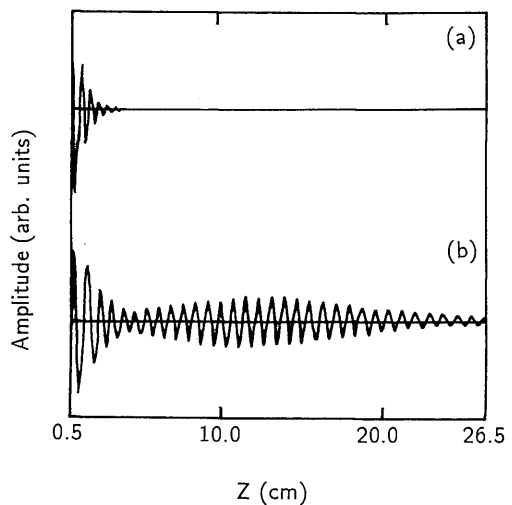
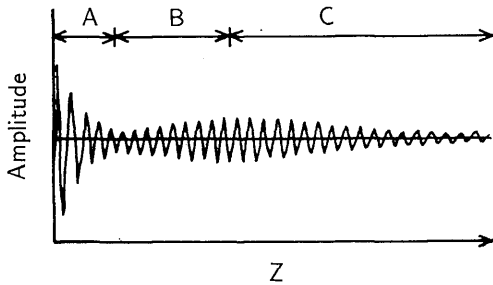


Fig. 2 Typical wave patterns of the ion wave at frequency 150 kHz, where the ion beam is not injected (a) and is injected (b).



**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

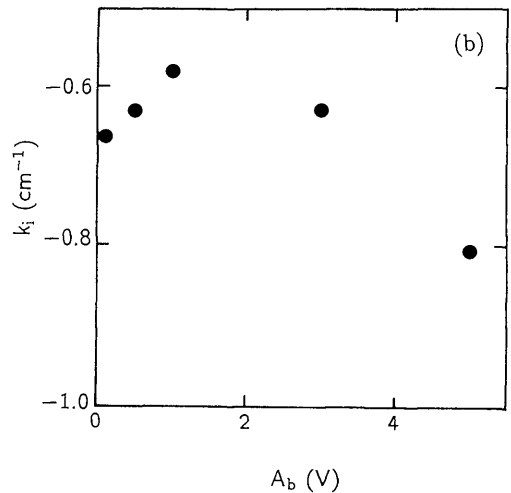
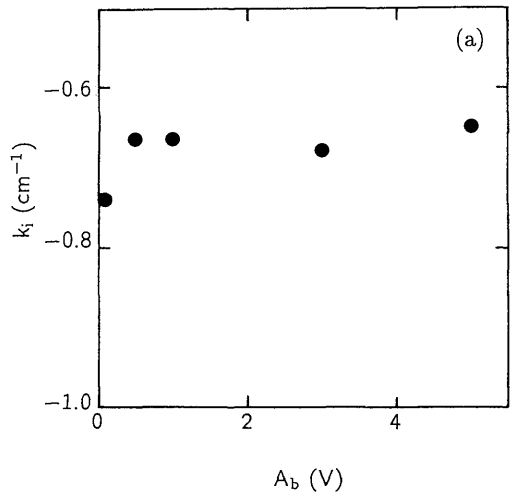
イオンビームは領域 2 よりも後方に存在する。

### 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。 $f_b=500\text{kHz}$  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

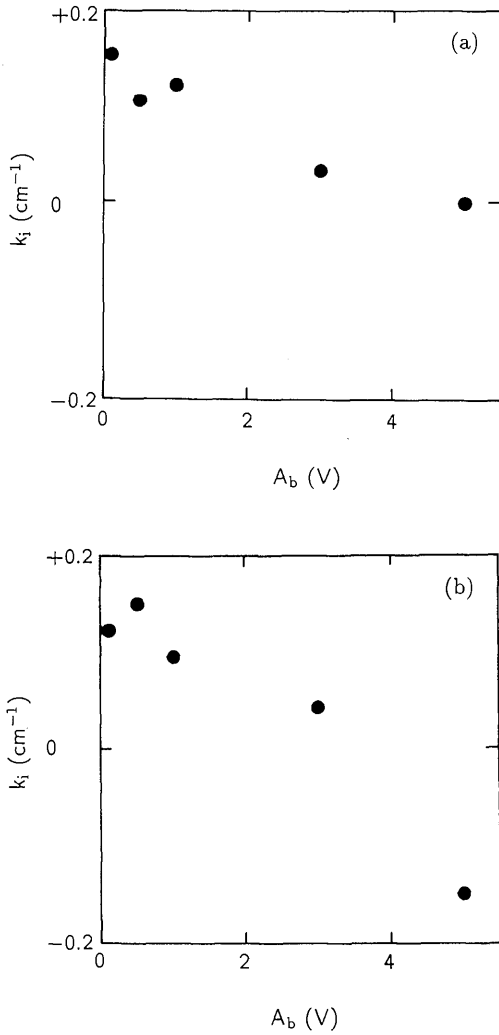
イオンビームが入射されている領域 2 では、減衰していた波が成長を始め、不安定性が励起される。本実験ではイオン波に対してイオンビームが角度を持って伝播しているので、測定したい方向の成分のみへのイオンビームの寄与を正確に評価することは非常に困難である。しかしながら、イオンビームの速度をイオン波の伝播方向へ射影した速度を  $V_b$ 、イオン音波の速度を  $C_s$  とすると  $V_b/C_s=2$  となり、この条件がイオン-イオン不安定性が励起される条件と一致する。また、実験で得られた分散関係がイオン-イオン不安定性の分散関係とほぼ一致する。従って、観測された不



**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-イオン不安定性であると考えられる。

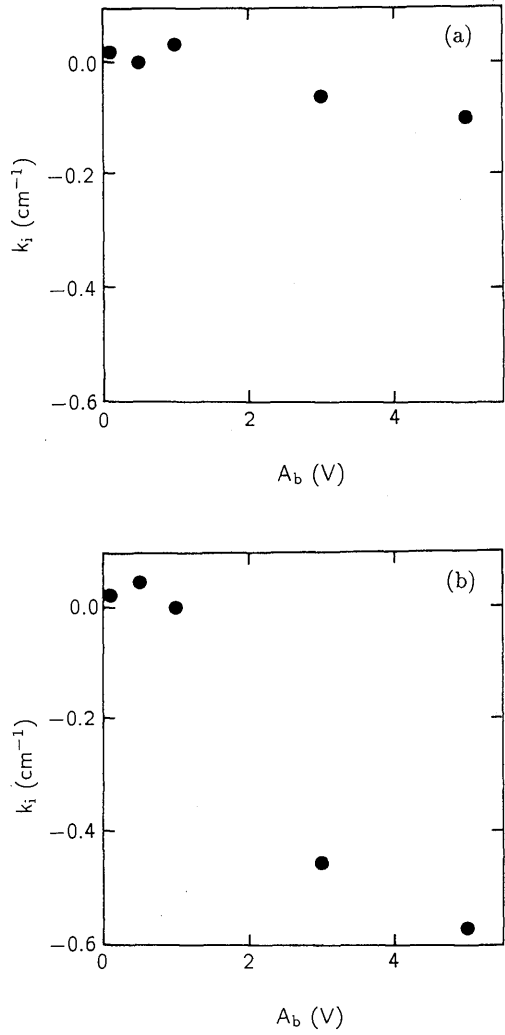
この不安定性はイオンビームに外場を印加することによって抑制される。このときの外場の振幅に対する波の成長率の変化を典型例を **Fig. 4** の場合と同様に **Fig. 5** に示す。この場合には、何れの  $f_b$  においても  $A_b$  の増加と共に成長率が小さくなっている。とりわけ、 $f_b=500\text{kHz}$  の場合に変化が著しく、 $A_b=4\text{V}$  では波は減衰するようになっている。



**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、セパレーショングリッドから約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  $f_b=500\text{kHz}$  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ぼ 7eV のままで変化しないことがわかった。一方、 $f_b=500\text{kHz}$  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、 $f_b=500\text{kHz}$  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、 $f_{pi}=660\text{kHz}$  であれば、 $f_b=700\text{kHz}$  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、 $f_b=500\text{kHz}$  のときほど大きな変化が現れなかったと予想される。

$f_b=500\text{kHz}$  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  $A_b$  の影響をほとんど受けていない。 $f_b=500\text{kHz}$  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、 $f_b=500\text{kHz}$  として  $A_b$  を変化させ、現れる2つのピークが現れるのであろう。そこで、 $f_b=500\text{kHz}$  として  $A_b$  を変化させ、現れる2つのピーク間のエネルギー差  $\delta$  を調べる、 $\delta$  が、外場の振幅  $A_b$  との間に  $\delta \propto A_b$  という関係があることが期待される。外場の振幅  $A_b$  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  $\delta$  は  $\delta \propto 0.3 A_b$  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  $\delta$  と  $A_b$  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-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-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-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  $f_b$  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  $f_b$  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  $\delta \propto 0.3 A_b$  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).
- 8) Y. Nishida, M. Tanibayashi, and K. Ishii: Phys. Rev. Lett., **24**, 1001 (1970).
- 9) 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. Lett.*, **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).
- 19) 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 Molecular Physics, 1991).
- 20) 例えば  
F. Doveil and D. Gresillon: *Phys. Fluids*, **18**, 1756 (1975).