

## イオン-イオン不安定性の外場による抑制

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

上田, 和宏  
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

田中, 雅慶  
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

小森, 彰夫  
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

他

<https://doi.org/10.15017/17193>

---

出版情報 : 九州大学大学院総合理工学報告. 12 (2), pp.195-200, 1990-09-01. 九州大学大学院総合理工学研究科  
バージョン :  
権利関係 :

# イオン-イオン不安定性の外場による抑制

齋藤和史\*・上田和宏・田中雅慶  
小森彰夫・河合良信

(平成2年5月30日 受理)

## Suppression of Ion-Ion Instabilities by an External Field

Yoshifumi SAITOU, Kazuhiro UEDA, Masayoshi TANAKA,  
Akio KOMORI, and Yoshinobu KAWAI

The suppression of the ion-ion instability excited in an ion beam-plasma system by an external field is experimentally investigated. We examine the behavior of the instability as a function of both amplitude and frequency of the external field and compare with the theoretical prediction. It is found that there exists a threshold and this threshold amplitude depends on the frequency. We also discuss the effect of the electron temperature and the ion distribution function with the external field on the suppression of the instability.

### 1. 序 論

プラズマ中で自然に励起された波が、外場を印加することによって抑制されることは従来から知られている。例えば、イオン音波不安定性については Keen と Fletcher<sup>1)-3)</sup> による実験が、電子ビームプラズマ系における不安定性については中村<sup>4),5)</sup>や福政による実験が<sup>6)</sup>、また、ドリフト波不安定性については西田ら<sup>7)</sup>の実験が、良く知られている。これらの実験結果は、強制項を持った Van der Pol 方程式によって定性的に説明されている。

外場によるイオン-イオン不安定性の抑制についても、Van der Pol 方程式によって定性的に説明できることが上田らによって報告された<sup>8),9)</sup>。しかし上田らは、この方程式では記述できない現象を見出しており<sup>8)</sup>、不安定性の外場による抑制については、不明な点が多い。

本研究は、外場によるイオン-イオン不安定性の抑制機構を明らかにするため、イオン-イオン不安定性外場依存性とプラズマパラメータ依存性を詳しく調べることが目的としている。第2章では実験装置と測定

方法について述べ、第3章では、干渉法を用いて不安定波やビームの成長率・減衰率を種々の実験条件下で測定し、これと同時にプラズマパラメータの変化等を調べた結果を示し、考察を行う。この結果を第4章にまとめる。

### 2. 実験装置

#### 2.1 ダブルプラズマ装置

Fig. 1 にダブルプラズマ装置の概略図を示す。真空容器は長さ 120cm、直径 70cm である。真空容器を 5

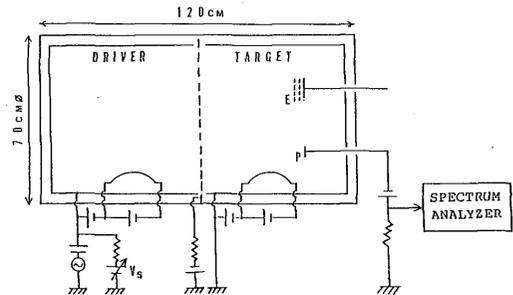


Fig. 1 Outline of the double plasma device. In this figure, E and P denote the energy analyzer and the Langmuir probe, respectively.

$\times 10^{-7}$ Torr 以下に排気し、そこへ Ar ガスを導入して約  $1 \times 10^{-4}$ Torr のガス圧で実験を行った。このとき電子温度  $T_e$  は約 1eV, 電子密度  $n_e$  は約  $(1 \sim 5) \times 10^8 \text{cm}^{-3}$  であった。

ドライバー側の枠には、イオンビーム生成用の電源とポンプ波用の発振器が接続されている。ドライバー側のスペースポテンシャル  $V_s$  をターゲット側のスペースポテンシャルよりも高くすると、このポテンシャルの差によってイオンが加速され、イオンビームが生成される。発振器はドライバー側のポテンシャルに正弦波を重畳し、ビームを交調するためのものである。実験では、 $u_b = 1.7C_s$  ( $u_b$  はイオンビームの速度,  $C_s$  はイオン音波の速度) であり、イオン-イオン不安定性の励起される条件  $1 < u_b/C_s \leq 2$  をみたしている。

### 2.2 測定方法

プラズマパラメータ等の測定には、Fig. 1 に示すように、平板型ラングミュアプローブと、静電型エネルギーアナライザーを使用した。平板型ラングミュアプローブの直径は 6mm であり、電子温度、電子密度の測定のほか、電子飽和電流によってプラズマ中の密度揺動をスペクトラムアナライザーへ入力するためにも使用する。静電型エネルギーアナライザーは直径が 2.5cm で、2 枚のメッシュ (400メッシュ, 開口率 27%) とコレクターから成る。

Fig. 2 に干渉波形測定時の測定回路の概略を示す。ポンプ波 (ドライバー側の枠に接続した発振器 (a)

により励起) とテスト波 (セパレーショングレッドに接続した発振器 (b) により励起) を印加した時のものである。次の第 3 章では、3.2 にポンプ波のみを印加した場合の実験結果を示し、3.3 にはポンプ波とテスト波を印加した時の実験結果を示す。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 イオン-イオン不安定性の励起とポンプ波による抑制

Fig. 3 に、実験によって得られたイオン-イオン不安定性の典型的なスペクトルと干渉波形を示す。約 100kHz から約 300kHz にかけて見られるブロードなスペクトルの波がイオン-イオン不安定性である。イオン-イオン不安定性であることは、Fig. 4 から分かるように、実験で得られた分散関係が、理論的に得られた分散関係と一致していることから明らかである。但し Fig. 4 中の FAST と SLOW は各々、イオンビームのファストモードとスローモードを表わしている。

Fig. 5 に、イオン-イオン不安定性にポンプ波を印加したときのスペクトルの例を示す。上側から順に 150kHz, 350kHz, 550kHz, 750kHz のポンプ波 (振幅は 210mV で一定; 以下、振幅は全て波高値の 2 倍の値で表わす) を印加したときのスペクトルが示されており一番下のスペクトルはポンプ波を印加していないときのものである。これらのスペクトル中の鋭いピー

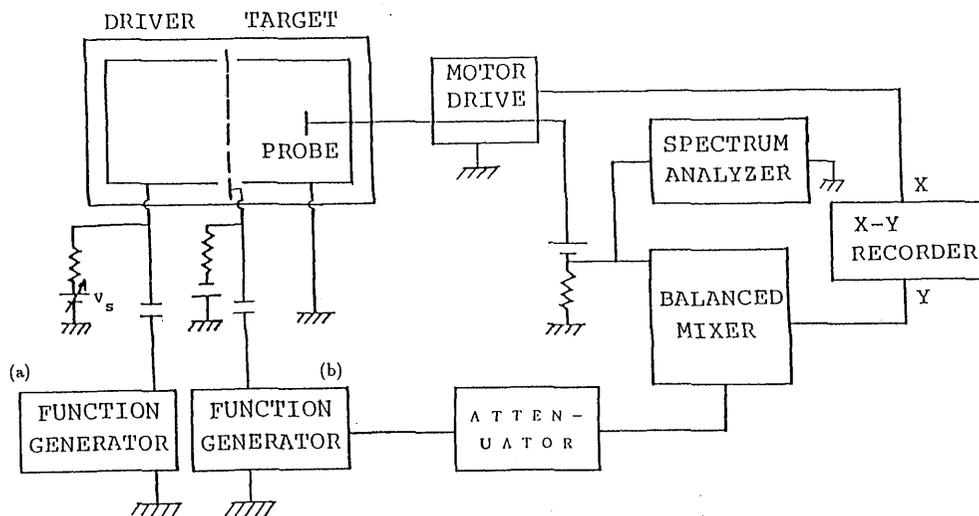


Fig. 2 The circuit for measuring wave patterns.

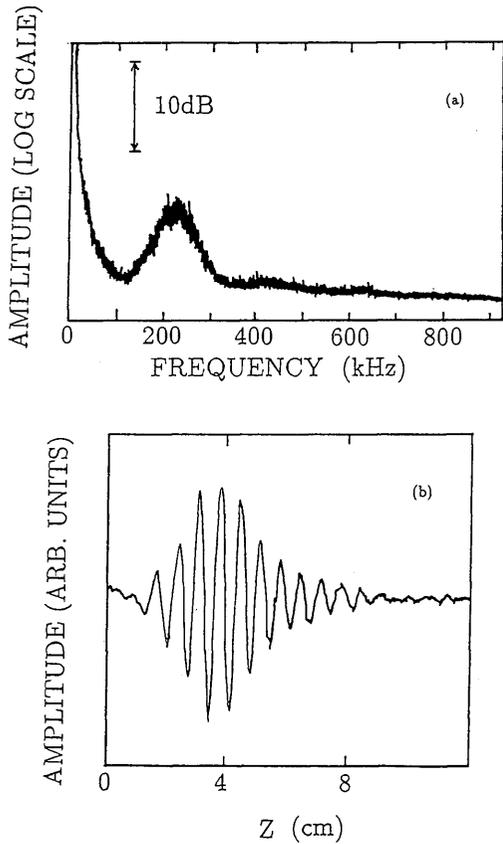


Fig. 3 Ion-ion instabilities, where (a) the frequency spectrum, and (b) the wave pattern for 200 kHz.

クはポンプ波を示している。この図のうち、150kHzのポンプ波を印加したときのスペクトルには300kHz近傍にも鋭いピークが見えるが、これはポンプ波の高調波である。

3.2 ポンプ波を印加した場合の成長率・減衰率

まず、不安定性が抑制されない範囲でポンプ波の振幅を一定(248mV)にし、不安定性の空間的な成長率(以後、成長率)とビームのファストモードの空間的な減衰率(以後、減衰率)のポンプ波の振動数に対する依存性を調べた。その結果を Fig. 6 に示す。不安定性の成長率  $k_i$  の振動数依存性が、スペクトラムアナライザーで観察された不安定性の振幅の振動数依存性に似ていることが分かる。但し、約 250kHz よりも高い振動数では成長率があまり変化していない。この

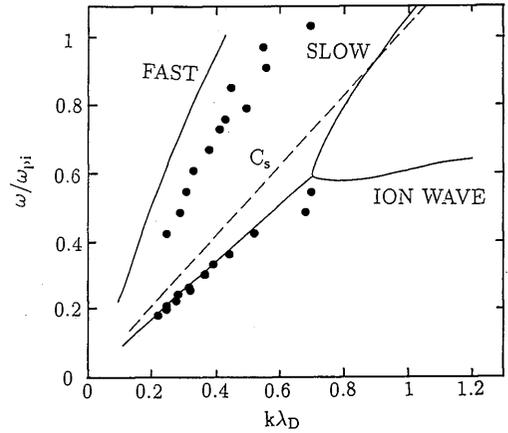


Fig. 4 Dispersion relation of ion-ion instabilities, where  $u_b = 1.7C_s$ ,  $T_e = 1 \text{ eV}$ ,  $n_e = (1 \sim 5) \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$ , and  $p = 1 \times 10^{-4} \text{ Torr}$ . Solid lines and dotted circles indicate the theoretical dispersion relation and experimental values, respectively. A broken line shows the ion acoustic speed,  $C_s$ .

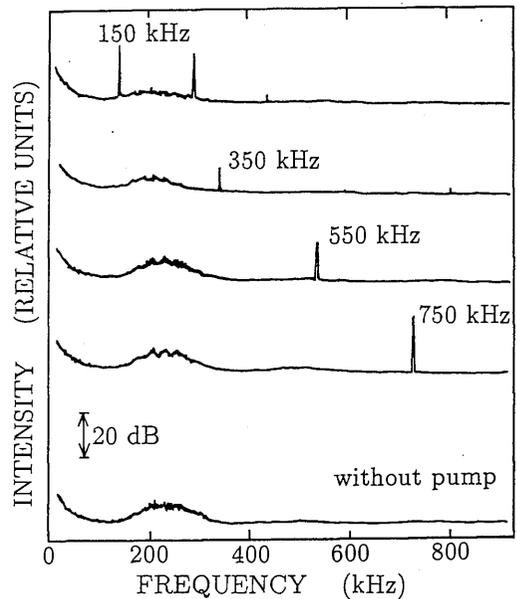
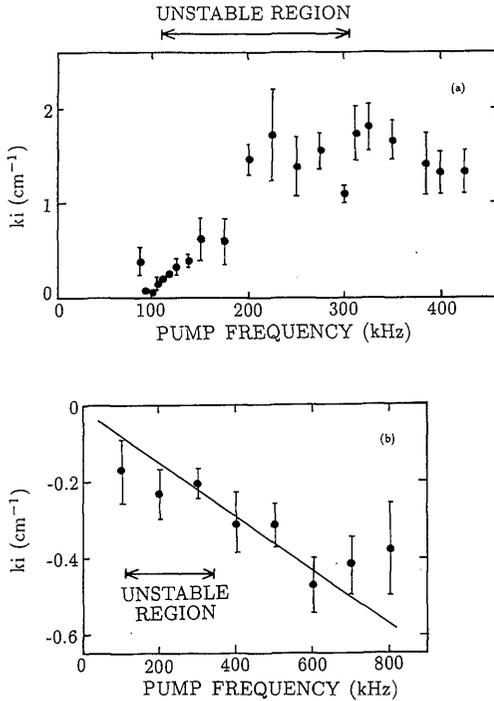
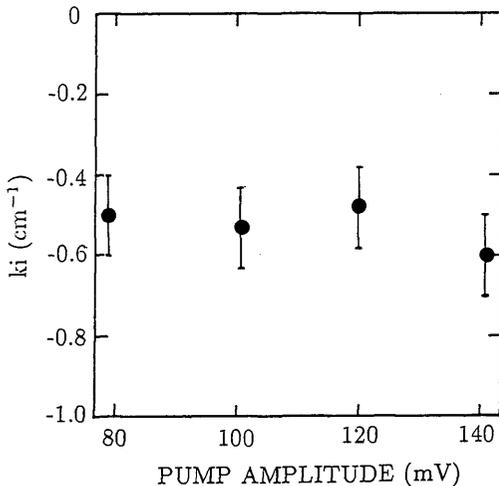


Fig. 5 Frequency spectrum in the presence of pump wave.

原因としては、約 250kHz よりも高い振動数領域では不安定性を干渉波形から識別することが難しく、精度の高い解析が出来なかったことが考えられる。ビーム



**Fig. 6** Imaginary part of the wavenumber as a function of pump frequency, where (a) growth rates of ion-ion instabilities, and damping rates of fast mode of the ion beam.



**Fig. 7** The dependence of damping rates of the pump wave on pump amplitudes.

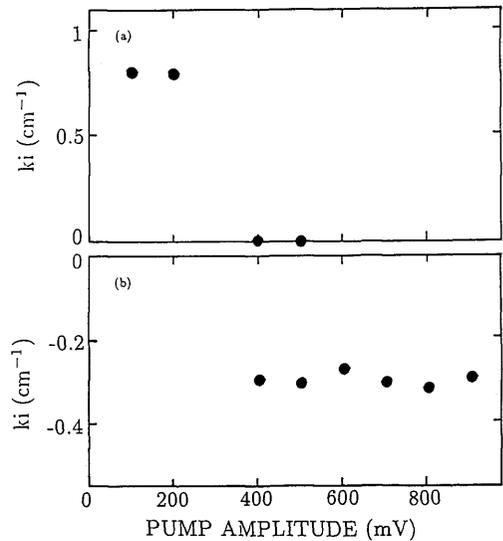
のファストモードは、振動数の増加につれて減衰率が指数関数的に大きくなり、Landau 減衰の時間的な減衰率の振動数依存性に似ていることが分かる。

次に、ポンプ波の振動数を一定 (550kHz) にし、振幅を変えて、ポンプ波の減衰率を調べた (Fig. 7). 不安定性が抑制されると、その抑制されたエネルギーによって、ポンプ波の減衰率が小さくなることが予想される。不安定性は、ポンプ波の振幅が 80mV のときには抑制されていないが、140mV のときには完全に抑制されている。しかしながら、図から明らかのように、減衰率はほとんど変化していない。

### 3.3 ポンプ波とテスト波を印加した場合の成長率・減衰率

ここではポンプ波に加え、テスト波として振幅が一定 (31.4mV) で振動数も一定 (240kHz) の振動を、セパレーショングリッドに印加する実験を行った。

**Fig. 8** はイオン-イオン不安定性のうちの 240kHz 成分の成長率とビームのファストモードの 240kHz 成分の減衰率のポンプ波の振幅に対する依存性を示している。ポンプ波の振動数は一定 (500kHz) である。この図から、不安定性の成長率はポンプ波の振幅が大きくなると零になることがわかる。また、ビームのファストモードの減衰率はポンプ波の振幅に依存しないこ



**Fig. 8** The dependence of (a) growth rates of the ion-ion instabilities, and (b) damping rates of fast mode of the ion beam on pump amplitudes.

とが分かる。但し約 300kHz では、成長する不安定性のモードと減衰するビームのモードが混在して分離することが困難であったため、成長率と減衰率を解析することができなかった。

次に、振幅と振動数が共に一定 (50.0mV, 240kHz) のテスト波のもとで、ポンプ波の振幅を一定 (168mV) にし、振動数を変えて不安定性 (ここでも 240kHz 成分) の成長率のポンプ波の振動数に対する依存性を調べた。ポンプ波の振幅は、ポンプ波の振動数が不安定性の振動数に近いときに不安定性抑制の閾値となるように設定してある。Fig. 9 から、約 200 kHz と約 700kHz で不安定性の成長率が小さくなる傾向にあることが分かる。即ち、波がエネルギーを失う傾向にある。

不安定性が抑制される原因の一つとして、ポンプ波を印加することによって電子温度やイオン温度が変化し、不安定性の成長率や減衰率が変換ることが考えら

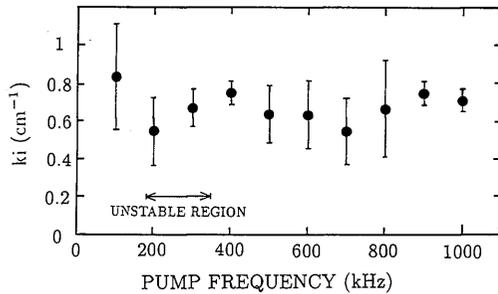


Fig. 9 The dependence of growth rates of the ion-ion instabilities on pump frequencies.

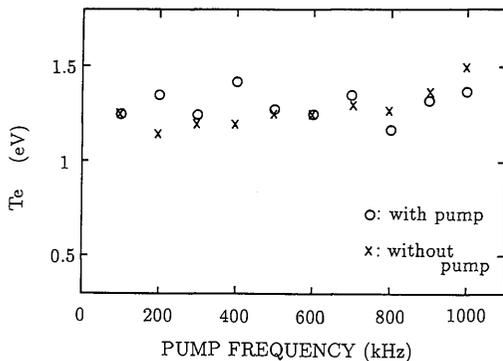


Fig. 10 The dependence of the electron temperature on pump frequencies.

れる。これを調べるために、電子温度を測定した結果を Fig. 10 に示す。不安定性が抑制されているときとないときで電子温度が変化していないことが分かる。また、現在使用しているエネルギーアナライザーではバルクイオンとイオンビームの分離ができないほど分解能が低いため、イオンの分布関数が変化したか否かは判断できなかった。

### 3.3 考察

イオン-イオン不安定性がポンプ波によって抑制されるときには不安定性の成長率が小さくなることからこの成長率が小さくなった分のエネルギーが、プラズマの加熱に使用されることやポンプ波の成長に利用され、ポンプ波の成長率が不安定性が抑制されたときに大きくなる可能性がある。しかしながら、ここまでの結果から、このエネルギーが電子の加熱には使われないことが分かり、また、ポンプ波の成長率も不安定性が抑制されたときに変化しないことから、ポンプ波の成長にも使われないと考えられる。今後の課題として次のようなことが考えられる。まず、本論文ではイオン温度やイオンの分布関数 (特にビームの分布<sup>10)</sup>) については詳しく調べられなかったが、これらがイオン-イオン不安定性の抑制に関係している可能性がある。

また、Minorsky によるストロボスコープ法<sup>11)</sup>や、Bogolyubov による漸近展開法<sup>12)</sup>を用いた Van der Pol 方程式の非同期抑制が Keen と Fletcher<sup>2)</sup> によって示されている。従って、実験で得られた、イオン-イオン不安定性の振動数よりも高い振動数の外場による抑制がこの非同期抑制によって説明できる可能性があり、Van der Pol 方程式を数値解析して実験との比較を行う必要がある。

### 4. まとめ

ダブルプラズマ装置を用いてイオン-イオン不安定性の抑制実験を行った結果、次のことが分かった。

(1) 不安定性の成長率とイオンビームのファストモードの減衰率を調べると、不安定性の成長率は 200kHz 近傍で最大となり、ビームのファストモードは Landau 減衰する。

(2) 不安定性が、抑制されているか否かにかかわらずポンプ波の減衰率は変化しない。

(3) ポンプ波とテスト波を印加する実験では、不安定性 (240kHz) の成長率は、ポンプ波の振幅が大きくなるにつれて小さくなる。一方、ビームのファスト

モード (240kHz) の減衰率は、ポンプ波の振幅によらず、ほぼ一定である。

(4) ポンプ波の振幅が 200kHz 近傍で不安定性を抑制する閾値程度のとき、200kHz 及び 700kHz 近傍で、やはりテスト波 (240kHz) の成長率が小さくなる。

#### 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: Phys. Rev. Lett., **24**, 130 (1970).
- 3) B. E. Keen, and W. H. W. Fletcher: J. Phys. D3, 1868 (1970).
- 4) Y. Nakamura: J. Phys. Soc. Japan, **28**, 1315 (1970).
- 5) Y. Nakamura: J. Phys. Soc. Japan, **31**, 273 (1970).
- 6) O. Fukumasa: Doctoral Thesis, Kyoto University (1981).
- 7) Y. Nishida, M. Tanibayashi, and K. Ishii: Phys. Rev. Lett., **24**, 1001 (1970).
- 8) 上田和宏他: 日本物理学会1987年秋の分科会講演予稿集, p. 113.
- 9) 藤田孝夫, 大沼俊郎, 安達三郎: 電気学会プラズマ研究会資料 (1974).
- 10) E. Okutsu, Y. Nomura, and Y. Nakamura: Phys. Lett., **72A**, 229 (1979).
- 11) N. Minorsky: *Introduction to Non-Linear Mechanics*, Edwards Brothers Inc., (1947).
- 12) N. N. Bogolyubov, and Y. A. Mitropol'skii: *Asymptotic Methods in the Theory of Non-Linear Oscillations*, Gordon and Breach Publishers, Inc., (1961).