

## 電子ビーム・プラズマ系におけるテスト波の分散関係

林, 信哉

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

篠原, 俊二郎

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/10.15017/17338>

---

出版情報 : 九州大学大学院総合理工学報告. 16 (2), pp.199-206, 1994-09-01. 九州大学大学院総合理工学研究科

バージョン :

権利関係 :

## 電子ビーム・プラズマ系におけるテスト波の分散関係

林 信 哉\*・田 中 雅 慶\*\*  
篠 原 俊 二 郎\*\*・河 合 良 信\*\*  
(平成6年5月31日 受理)

### Dispersion Relation of Test Waves in an Electron Beam Plasma System

Nobuya HAYASHI\*, Masayoshi TANAKA\*\*,  
Shunjiro SHINOHARA\*\* and Yoshinobu KAWAI\*\*

Test waves are propagated in an electron beam plasma system and the dispersion relation is measured. At the center of the experimental region a beam mode is excited. Near the chamber wall an electron plasma wave is excited and propagates from the chamber wall to the center of the experimental region. It is also found that observed unstable waves are standing wave which is formed by superposing the beam modes propagating opposite directions each other.

#### 1. はじめに

電子ビームがプラズマ中を通過すると不安定性により波動が励起されることは良く知られている<sup>1,2,3)</sup>. O'Neil と Malmberg は、電子ビーム・プラズマ系において、電子ビームの速度分布が時間的あるいは空間的に変化する場合の分散関係の変化を理論的に調べた<sup>4)</sup>. 電子ビームの速度分布が $\delta$ 関数と見なせる場合は、2流体不安定性により不安定性が励起され、 $\text{Re}(\omega) \approx ku$ の分散関係を満たすビームモードの波が不安定となる。しかし、電子ビームが熱的広がりを持つようになると2流体不安定性よりも逆 Landau 減衰の効果が支配的となり、 $\text{Re}(\omega) \approx \omega_{pe}$ の分散関係を満たすビームラングミュアモードの波が励起される。即ち、時間的または空間的に不安定モードが変化する可能性を理論的に示した。

我々は O'Neil と Malmberg の理論を検証するために、ダブルプラズマ (D. P.) 装置を用いて電子ビーム・プラズマ系を実現し、不安定波動の分散関係について研究を行った。これまで、電子プラズマ周波数  $f_{pe}$  近傍でモードの異なる2つの波が存在することを見出し、電子の速度分布関数と波動の分散関係を調べ

た。その結果、D. P. 装置のセパレーショングリッド付近には2流体不安定性によりビームモードの波が励起され、対向するチェンバー壁付近には逆 Landau 減衰の効果によりビームラングミュアモードが励起される可能性を示す結果が得られた<sup>5)</sup>。しかしながら、波の伝播方向の測定に誤差が大きく結論を得るには至っていない。本研究では、電子ビーム・プラズマ系を形成し、テスト波を伝播させてその分散関係及び波の伝播方向の測定を行い、不安定波動のモードを同定する。

第2章で実験装置及び測定方法を説明し、実験結果及び考察を第3章で述べる。第4章で得られた結論をまとめる。

#### 2. 実験装置及び測定方法

**Fig. 1** に実験装置の概要を示す。ダブルプラズマ (D. P.) 装置は長さ 120cm、直径 70cm のステンレス製真空容器である。この容器内を圧力  $3.0 \times 10^{-7}$  Torr 以下まで排気した後、アルゴンガスを導入して  $1.5 \sim 2.0 \times 10^{-4}$  Torr の圧力で実験を行った。真空容器内には永久磁石を封入したステンレス製パイプで作られた枠が2個設置されている。この枠の円周には12本のトリエッドタングステンフィラメントが取り付けられている。フィラメントから放出される熱電子は、フィラメントとステンレスパイプの間に印加される

\*高エネルギー物質科学専攻博士後期課程

\*\*高エネルギー物質科学専攻

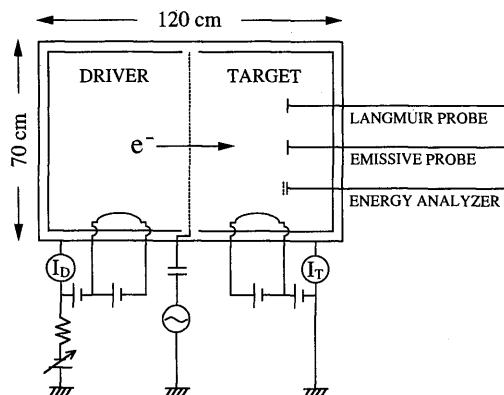


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus.

30~90V の放電電圧で加速され、中性粒子を衝突により電離してプラズマを生成する。

D. P. 装置は、フローティング電位に保たれた中央のセパレーショングリッドによりドライバー領域とターゲット領域の2つの領域に分けられており、プラズマパラメーターを独立に制御できる。典型的なプラズマパラメーターは、ドライバー側で電子密度  $10^7 \text{ cm}^{-3}$ 、電子温度 0.4eV ターゲット側で電子密度  $10^8 \text{ cm}^{-3}$ 、電子温度 0.4eV であった。ターゲットプラズマを接地しドライバープラズマに負の電圧  $V_s$  を印加すると、2つのプラズマ間にポテンシャルの差が生じてドライバープラズマ中の電子がターゲットプラ

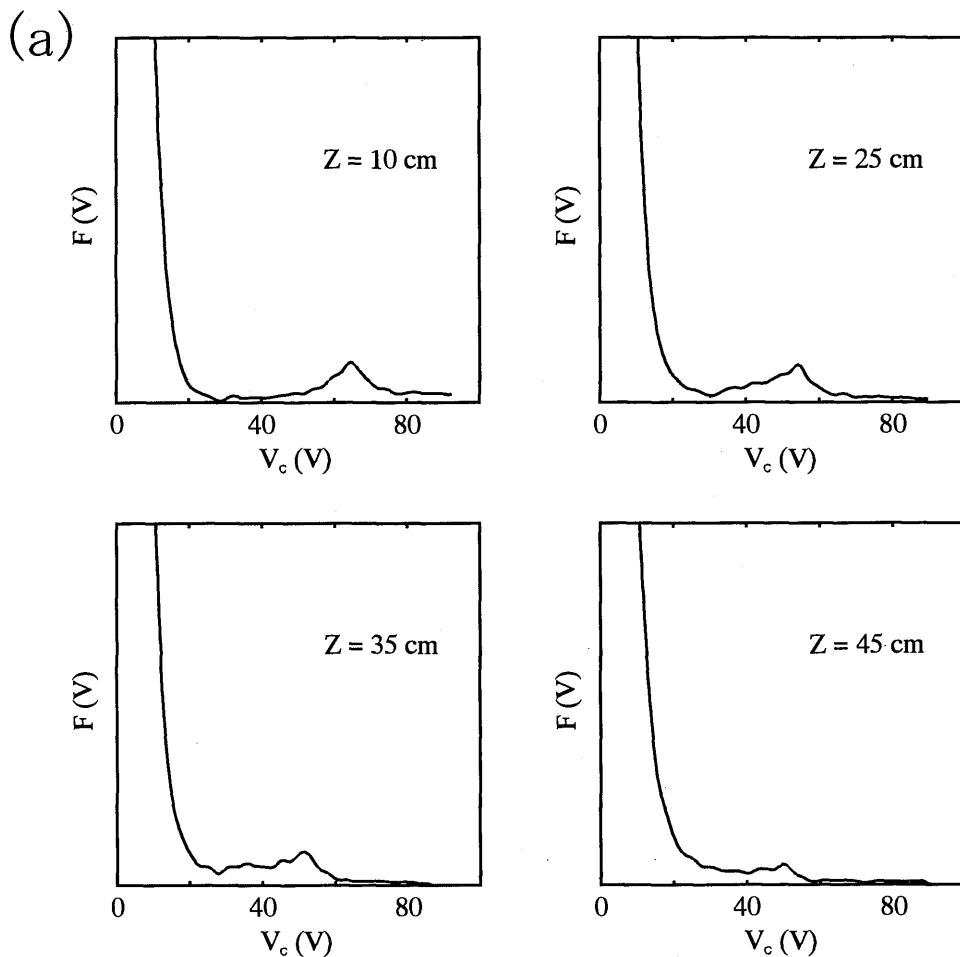


Fig. 2 (a) Energy distribution functions of electrons measured with energy analyzer which is placed upstream direction (a), and downstream direction (b). Z denotes a distance from grid.

ズマに入射し、電子ビーム・プラズマ系が形成される。

プラズマの密度及び温度の測定には平板ラングミュアプローブを用いた。電子のエネルギー分布関数は、エネルギーアナライザを用いて測定した。セパレーショングリッド向きのファラデーカップで、セパレーショングリッドから対向するチェンバー壁の方向に進む電子を検出し、チェンバー壁向きのファラデーカップで、チェンバー壁からセパレーショングリッドの方向に進む電子を検出した。プラズマ中の波動は平板型ラングミュアプローブで検出し、スペクトルアナライザ及び干渉法を用いて計測した。波動の伝播方向は、同軸型の位相計により参照信号の位相を変化させて干

渉波形を測定することにより求めた。

### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 電子ビーム・プラズマ不安定性の励起

電子ビーム・プラズマ系における不安定波のモードは、電子ビームのエネルギー分布に依存して変化する。従って不安定となるモードを調べるためには、電子のエネルギー分布関数を正確に測定する必要がある。測定した電子のエネルギー分布関数を Fig. 2 (a), (b) に示す。Fig. 2 (a) はセパレーショングリッドの方向を向いたファラデーカップで測定し、Fig. 2 (b) はチェンバー壁の方向を向いたファラデーカップを用いて測

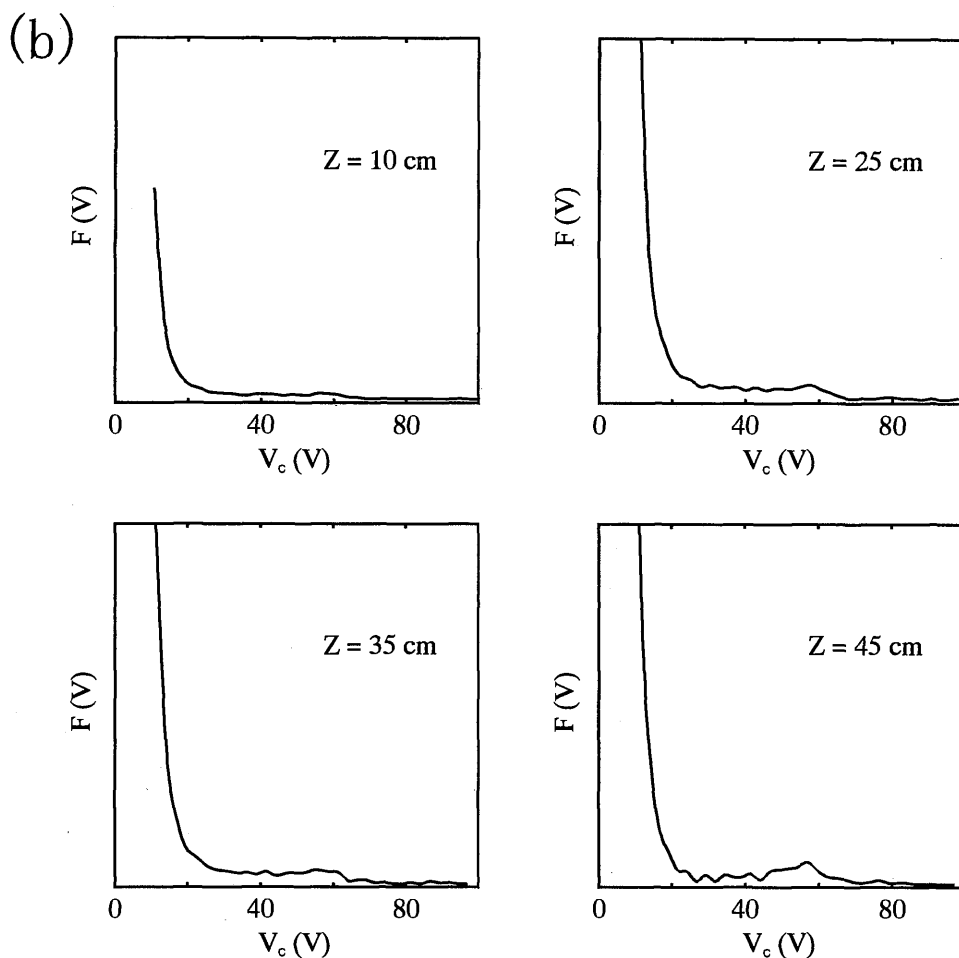


Fig. 2 (b) Energy distribution functions of electrons measured with energy analyzer which is placed upstream direction (a), and downstream direction (b).  $Z$  denotes a distance from grid.

定した。ここで  $Z$  はセパレーショングリッドからの距離である。電子ビームのプラズマに対する密度比は約0.005であった。Fig. 2 (a) より、セパレーショングリッドからチャンバー壁の方向に進む電子ビームは、領域中央付近までは熱的広がりが比較的小さく、チャンパー壁付近では熱的広がりが大きくなり減衰することが分かる。また Fig. 2 (b) からチャンパー壁からセパレーショングリッドの方向に進む電子ビームが存在することが分かる。この電子ビームは  $Z$  が小さくなるにつれて減衰していくことから、入射電子ビームがチャンパー壁付近で反射して生じた反射電子ビームであると考えられる。

電子ビームとプラズマとの相互作用により、電子ビーム・プラズマ不安定性が励起される。流体論による電子ビーム・プラズマ系の波動の分散関係は次式で与えられる<sup>6)</sup>。

$$\frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2 - \frac{3}{2} k^2 v_{the}^2} + \frac{\omega_{pb}^2}{(\omega - ku)^2} = 1 \quad (1)$$

ここで、 $\omega_{pe}$ 、 $\omega_{pb}$  は、

$$\omega_{pe}^2 = \frac{4\pi n_e e^2}{m_e}$$

$$\omega_{pb}^2 = \frac{4\pi n_b e^2}{m_e}$$

である。 $u$  は電子ビームの速度、 $v_{the}$  はバルク電子の熱速度であり、 $n_e$ 、 $n_b$  はバルク電子及びビーム電子の密度である。

D. P. 装置内で励起される不安定性を同定するために、スペクトルアナライザーを用いて測定を行った。プローブをセパレーショングリッドから 12cm に固定して測定した典型的な周波数スペクトルを Fig. 3 に示す。このとき電子プラズマ周波数  $f_{pe}$  は約 160MHz である。電子ビーム・プラズマ不安定性によって励起される波の最大成長率  $\gamma_{max}$  は、

$$\gamma_{max} \approx \frac{1}{2^{\frac{3}{2}}} \omega_{pe} \left( \frac{n_b}{n_e} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

で与えられる。このとき、最大成長率となる不安定波の周波数  $\omega_r$  は次式で与えられる。

$$\omega_r \approx \omega_{pe} - \frac{1}{2^{\frac{3}{2}}} \omega_{pe} \left( \frac{n_b}{n_e} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (3)$$

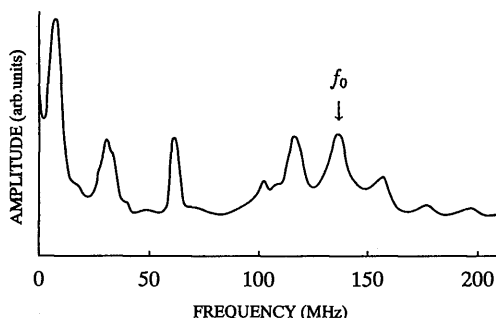


Fig. 3 Typical frequency spectrum measured at 12cm from the separation grid.

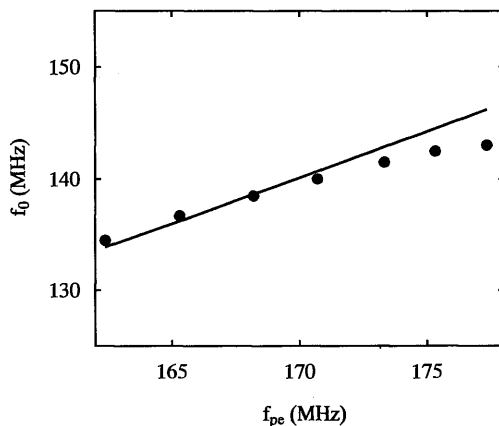


Fig. 4 Dependence of the frequency of unstable waves on the density. Solid line denotes the frequency at which the growth rate of the electron beam plasma instability becomes maximum.

本実験では  $\omega_r$  は 139MHz であることから、Fig. 3 に  $f_0$  で示される 135MHz 付近の波は不安定波の可能性が考えられる。

Fig. 3 の  $f_0$  の波の周波数を、プラズマの密度を変化させて測定した結果を Fig. 4 に示す。実線は (3) 式で表される理論曲線である。 $f_0$  の波の周波数はプラズマの密度の上昇とともに大きくなる。この周波数変化の傾向と電子ビーム・プラズマ不安定性の周波数変化の傾向とは定性的に一致することが分かる。

また、Fig. 3 の  $f_0$  の波の振幅の空間的変化をスペクトルアナライザーを用いて測定した。得られた波形を Fig. 5 に示す。このとき  $V_s = 80V$  である。この波形から、 $f_0$  の波は定在波であると思われる。この波

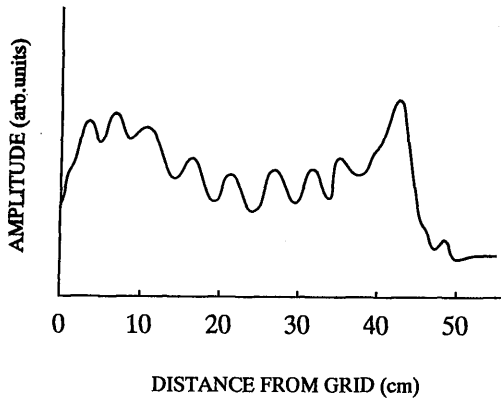


Fig. 5 Spatial profile of the amplitude of unstable wave measured with a spectrum analyzer.

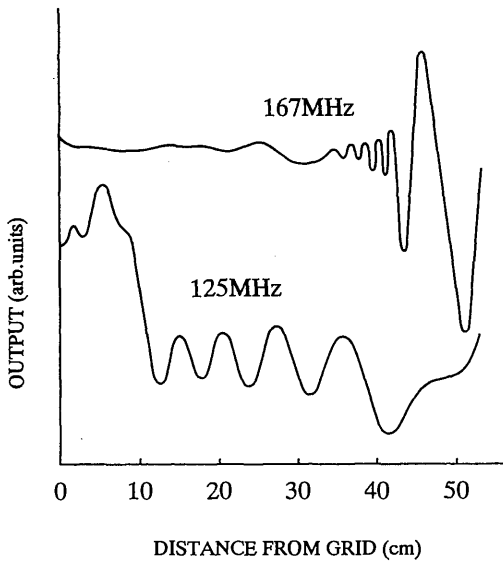


Fig. 6 Typical wave patterns near the electron plasma frequency  $f_{pe}$ .

形の波長を不安定波の波長の1/2とすると、不安定波の波長と周波数との積は電子ビームの速度によく一致する。従って、ここで観測される不安定波は電子ビーム・プラズマ不安定性で、定在波である可能性が考えられる。

電子ビーム・プラズマ系において励起される波動の分散関係及び伝播方向を調べるために、プラズマ中にテスト波を励起して干渉法により波動を測定した。典型的な干渉波形を Fig. 6 に示す。このとき、電子プ

ラズマ周波数  $f_{pe}$  は約 160MHz であった。この図より、実験領域中央付近に  $f_{pe}$  より低い周波数で波長の長い波が励起され、チェンバー壁付近には  $f_{pe}$  近傍の波長の短い波が励起されていることが分かる。実験領域中央付近の波とチェンバー壁付近の波は波長が明らかに異なる。従って、これらの波はモードの異なる波であると予想される。

### 3.2 実験領域中央付近の波について

まず、実験領域中央付近に励起される波について測定を行った。干渉波形より得られる分散関係を Fig. 7 に示す。実線は(1)式で表される電子ビーム・プラズマ系の理論曲線であり、 $Z=15\text{cm}$  の時の値である。実験領域中央付近の波動の分散関係は理論曲線のビームモードのブランチとほぼ一致していることが分かる。

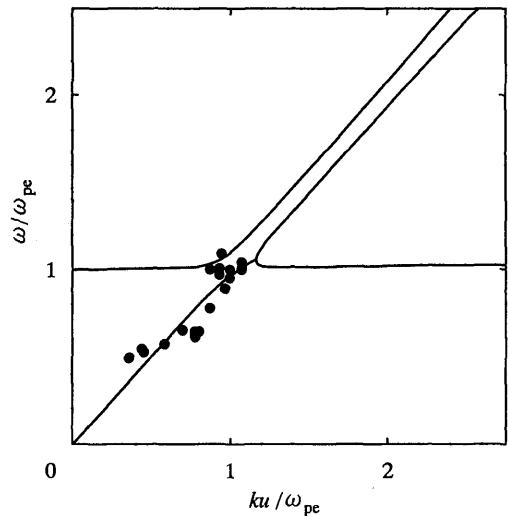


Fig. 7 Dispersion relation of waves at the center of the experimental region. Solid line denotes the dispersion curve of the electron beam plasma instability.

位相計を用いて波動の伝播方向を調べた結果を Fig. 8 (a), (b) に示す。それぞれの図について、上の波形に対して下の波形は参照信号の位相を約  $\pi/2$  遅らせて測定した。Fig. 8 (a) よりセパレーショングリッドからチェンバー壁の方向に伝播するビームモードが存在し、Fig. 8 (b) よりチェンバー壁からセパレーショングリッドの方向に伝播するビームモードが存在することが分かる。従って、電子のエネルギー分布

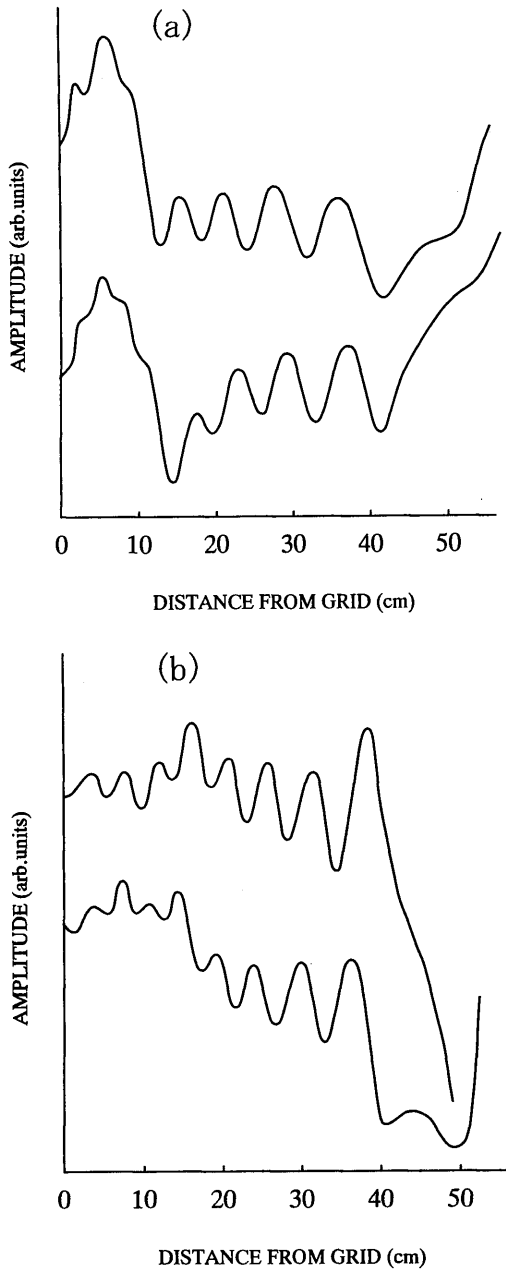


Fig. 8 Wave patterns when the phase of reference signal is changed. Figures (a) and (b) are measured under the same condition.

関数は空間的に変化し、分散関係は O'Neil と Malmberg の理論と似ているが、逆方向に伝播する波が存在しており O'Neil と Malmberg の理論とは異なって

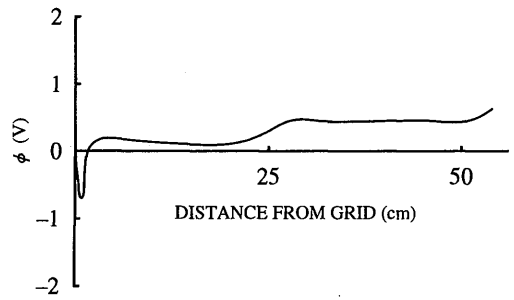


Fig. 9 Spatial profile of the space potential at the experimental region measured with an emissive probe.

いると結論される。

波動が逆方向に伝播する機構を調べるために、ターゲットプラズマの電位分布を測定した。Fig. 9 から実験領域中央付近にポテンシャルが大きく上昇する部分が存在することが分かる。そこでセパレーショングリッドからチャンバ壁の方向に伝播するビームモードが反射して、逆方向に伝播する反射波が生じると考えられる。加藤らは、電子ビームの入射により形成されるポテンシャル分布を計算し、同様な分布を得ている<sup>7)</sup>。このことについて今後詳しい比較が必要である。

以上の結果より、実験領域中央付近に励起される不安定性は、互いに逆方向に伝播するビームモードが重なり合うことによって生じた定在波である可能性が考えられる。

### 3.3 チェンバ壁付近の波について

D. P. 装置のチェンバ壁付近には、Fig. 6 に示すように電子プラズマ周波数  $f_{pe}$  近傍で波長の短い波が励起される。チェンバ壁付近ではビームの熱的広がりが大きくなることから、これまでこの波については O'Neil と Malmberg が指摘したように、逆 Landau 減衰により実験領域中央からチェンバ壁に向かってビームラングミュアモードが成長しながら伝播していると考えてきた。

そこで、本研究ではチェンバ壁付近の波について分散関係及び伝播方向の詳しい測定を行った。干渉波形より得られるチェンバ壁付近の波の分散関係を Fig. 10 に示す。実線は運動論による電子プラズマ波の分散曲線であり、

$$1 = \frac{\omega_{pe}^2}{k^2 v_{the}^2} Z\left(\frac{\omega}{k v_{the}}\right) \quad (4)$$

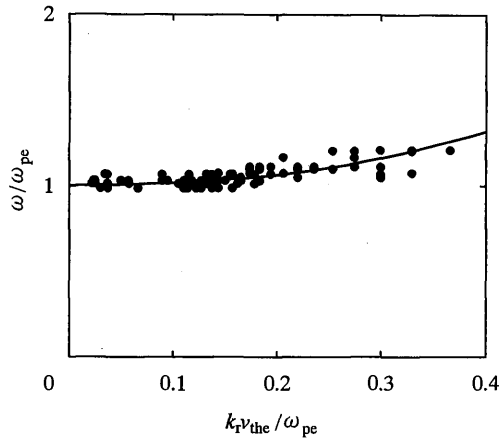


Fig. 10 Dispersion relation of waves near the chamber wall. Solid line denotes the dispersion curve of an electron plasma wave.

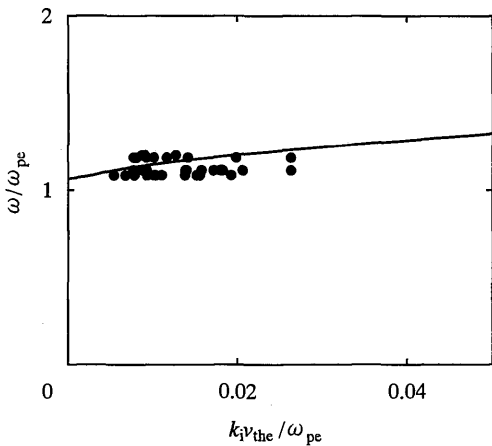


Fig. 11 Damping rate of waves near the chamber wall. Solid line denotes the damping rate of an electron plasma wave.

与えられる。ここで  $Z$  はプラズマ分散関数である<sup>8)</sup>。チェンバー壁付近の波の分散関係は電子プラズマ波の分散曲線とよく一致していることが分かる。同様に干渉波形より求めた減衰率を Fig. 11 に示す。チェンバー壁付近の波の減衰率は、実線で示される電子プラズマ波の減衰率とほぼ一致している。

波動の伝播方向を調べるために、位相計を用いて干渉波形を測定した。結果を Fig. 12 に示す。上の波形に対して下の波形は参照信号の位相を約  $\pi/2$  遅らせて測定した。この図から、波動はチェンバー壁から実

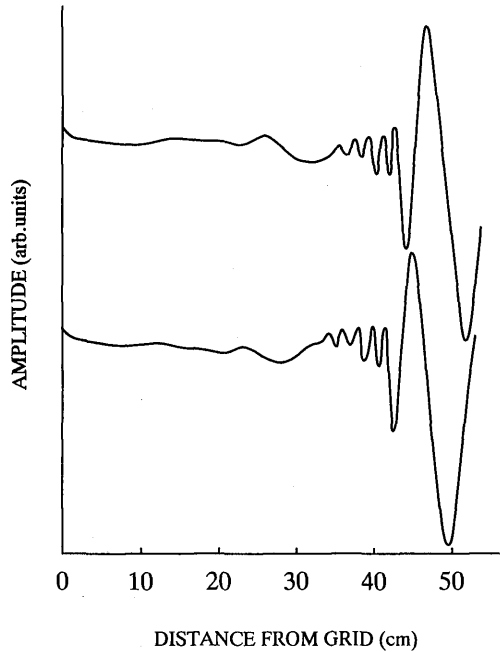


Fig. 12 Wave patterns when the phase of reference signal is changed.

験領域中央へ伝播していることが分かる。

以上の結果より、チェンバー壁付近に励起される波動はチェンバー壁から実験領域中央へ減衰しながら伝播する電子プラズマ波であると考えられる。よって O'Neil と Malmberg のモデルとは異なっている。この波動の励起機構としては、direct coupling によってチェンバー壁またはその近傍の永久磁石が封入された枠などがエキサイターとなり電子プラズマ波が励起される可能性が考えられる。

#### 4. 結 論

電子ビーム・プラズマ系にテスト波を伝播させて励起される波動を測定し、波動の分散関係及び伝播方向を調べた結果、以下のことが分かった。

1. 実験領域中央付近のテスト波には、セパレーショングリッドからチェンバー壁の方向に伝播する波と、チェンバー壁からセパレーショングリッドの方向に伝播する波とが存在する。これらの波は入射電子ビームによって励起されるビームモードと、このビームモードがポテンシャルの上昇部分で反射して生じた反射波である。



2. 実験領域中央付近に励起される不安定波は電子ビーム・プラズマ不安定性で、互いに逆方向に伝播するビームモードの波がポテンシャルの低い領域で重なりあうことによって生じた定在波である。

3. チェンバー壁付近のテスト波はチェンバー壁からセパレーショングリッドの方へ減衰しながら伝播する電子プラズマ波である。

#### 参 考 文 献

- 1) D. Bohm and E. P. Gross: Phys. Rev. **75** (1949) 1851.
- 2) H. Derfler and T. C. Simonen: Phys. Rev. Letters **17** (1966) 172.
- 3) Y. Kawai, Y. Nakamura, T. Itoh, T. Hara, T. Kawabe: J. Phys. Soc. Jpn. **38** (1975) 876.
- 4) T. M. O'Neil and J. H. Malmberg: Phys. Fluids **7** (1964) 1534.
- 5) T. Kasuya, M. Tanaka, A. Komori and Y. Kawai: J. Phys. Soc. Jpn. **59** (1990) 3931.
- 6) F. F. Chen: *Introduction to Plasma Physics* (Plenum Press, New York, 1974).
- 7) H. Kato: *private communication*.
- 8) B. D. Fried and S. D. Conte: *The Plasma Dispersion Function* (Academic Press Inc., New York, 1961).