九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

電子ビームプラズマ系における不安定モードのビームタイプからＬａｎｇｍｕｉｒタイプへの移行

粕谷，俊郎
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

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

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/10.15017/17194

出版情報：九州大学大学院総合理工学報告. 12 (2), pp.201-205, 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：

九州大学総合理工学研究科報告
第12巻 第2号 201-205頁 平成2年9月

Engineering Sciences Reports, Kyushu University
(KYUSHU DAIGAKU SOGORIKOGAKU KENKYUKA HOKOKU)
Vol. 12, No. 2 pp. 201 - 205 September 1990

電子ビームプラズマ系における不安定モードのビームタイプから Langmuir タイプへの移行

粕谷俊郎*・田中雅慶
小森彰夫・河合良信

(平成2年5月31日 受理)

Transition of Unstable Modes from the Beam Type to Langmuir Type in an Electron Beam Plasma System

Toshirou KASUYA, Masayoshi TANAKA, Akio KOMORI
and Yoshinobu KAWAI

We investigate the topological change of an electron beam plasma instability using a double plasma. We find experimentally the transision of the unstable mode from beam type to Langmuir type. And it is found that the transition is caused by the broadening of an electron beam distribution function.

1. 緒　　言

プラズマ中に電子ビームを入射することにより励起されるプラズマ周波数 f_p 近傍の静電波は，実験室プラズマやスペースプラズマにおいて観測され，興味ある話題となっている．電子ビーム・プラズマ不安定性に関する理論的な研究は古くから行われており，電子ビームの温度が零と見なせる場合と有限の温度を持つ場合に対応して，2つのタイプの不安定性が存在することが知られている．

Bohm と Gross[1] そして Briggs[2] は，2つのタイプの電子ビームプラズマ不安定性の発生機構の差異が，現象を流体的に取り扱うことができるか運動論的に取り扱わなければならないかという点にあることを示した．現象を流体的に取り扱える場合には，不安定性の生じるメカニズムは次のようなものである．静電波がビーム粒子を捕捉してバンチし，それによって生じた電場により静電波の振幅が大きくなる．静電波の振幅が大きくなると捕捉される粒子の数が増大し，波をさらに大きくするというくり返しにより静電波が成長する．それに対して，現象を運動論的に取扱う必要がある場合には，不安定性の生じるメカニズムは逆 Landau 減衰となる．

O'Neil と Malmberg[3] はこの2つのタイプの不安定性を分散特性に従って区別した．この2つのタイプの分散特性を **Fig. 1** に示す．**Fig. 1(a)** は電子ビームの分布関数がデルタ関数的な場合，つまりビーム温度が零と見なせる場合の分散特性であり，この場合には流体的な取扱いが出来る．**Fig. 1(b)** は電子ビームの分布関数が広がりを持つ場合，つまりビーム温度が有限の値を持つ場合の分散特性であり，この場合には運動論的な取扱いが必要となる．**Fig. 1(a)** では，$\omega = ku$ という分散関係を満足するビームモードの波が不安定となり，**Fig. 1(b)** では，$\omega \sim \omega_p$ という分散関係を満足する Langmuir モードの波が不安定となる．ここで ω_p はプラズマ角周波数，u はビーム速度である．分散特性はビーム温度が大きくなるにつれて **Fig. 1(a)** のタイプから徐々に変化し，ビーム温度がある値になると **Fig. 1(b)** のタイプの分散特性へとその位相的性質が変化する．O'Neil と Malmberg はこの分散特性の位相的な性質の変化を，電子ビームが低密度で Lorentz 分布に従う場合について調べたが，McQuillan らはビームが Maxwell 分布に従う場合について[4]，Cairns はビームが比較的高密度の場合についても[5]，同様の分散特性の位相的性質の変化が，ある規格化されたビーム温度の値で生じることを明らかにした．

高エネルギー物質科学専攻
*高エネルギー物質科学専攻博士後期課程

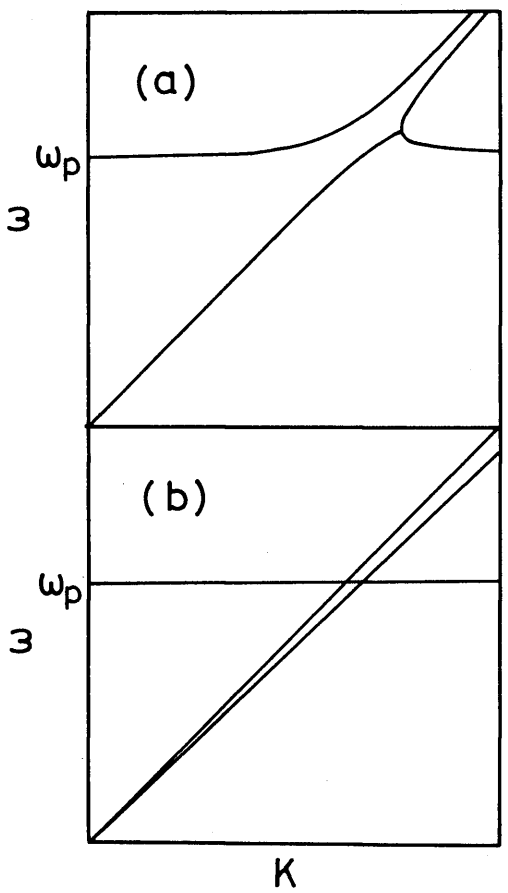

Fig. 1 Dispersion relations. Electron beam distribution function is (a) a delta function and (b) a gentle bump function.

これに対して，この分散特性の位相的性質の変化に関する実験的な研究は全くなされていない．この論文では，この分散特性の位相的な性質の変化を実験的に詳しく調べたので報告する．第2節では理論的背景の簡単なレビューを行い，第3節では実験装置及び実験方法について説明する．第4節では実験結果及び考察を，第5節には結論を示す．

2. 理論的背景

電子ビームプラズマ系の線形分散関係は次のようになる[1]．

$$1=\frac{\omega_p^2}{k^2}\int_{-\infty}^{+\infty}dv\,\frac{k\,\partial f_e/\partial v}{kv-\omega}+\frac{n_B}{n_p}\frac{\omega_p^2}{k^2}\int_{-\infty}^{+\infty}dv\,\frac{k\,\partial f_B/\partial v}{kv-\omega} \tag{1}$$

ここで，ω_p は電子ビームプラズマ角周波数，f_e はプラズマの電子速度分布関数，f_B は電子ビームの電子速度分布関数，n_B はビーム密度，n_p はプラズマ密度である．

プラズマと電子ビームの電子速度分布関数をもとに Maxwell 分布であると仮定する．

$$f_e(v)=\frac{1}{(2\pi)^{3/2}v_p^3}\exp\left(-\frac{v^2}{2v_p^2}\right) \tag{2}$$

$$f_B(v)=\frac{1}{(2\pi)^{3/2}v_B^3}\exp\left(-\frac{(v-v_D)^2}{2v_B^2}\right) \tag{3}$$

ここで，$v_P=(T_e/M_e)^{1/2}$，$v_B=(T_B/m_e)^{1/2}$，v_D は電子ビームのドリフト速度である．

ビームの熱的広がりの程度により，ビームモードが不安定になるか Langmuir モードが不安定になるかが決まる．ビームの熱的広がりを評価するために，次のような規格化された変数を用いる．

$$s=\frac{v_B}{v_D}\left(\frac{2n_p}{n_B}\right)^{1/3} \tag{4}$$

(1)式を数値計算することによって，v_B/v_D と n_B/n_p のパラメータ空間においてビームモードと Langmuir モードのどちらが不安定になるかを調べた，その結果を **Fig. 2** に示す．ある閾値を境として，不安定モー

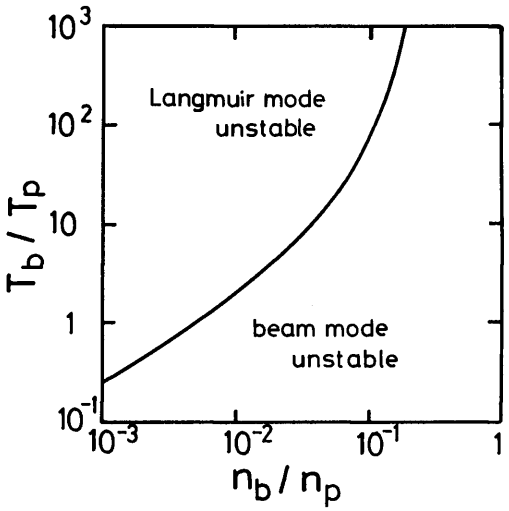

Fig. 2 Boundary curve between beam mode and Langmuir mode.

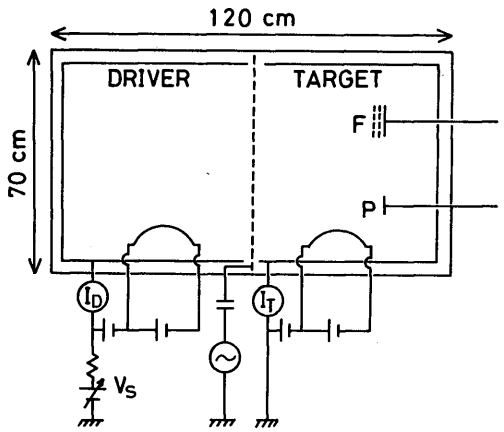

Fig. 3 Schmatic of experimental apparatus. E and P reperesent a retarding energy analyzer and a plane Langmuir probe, respectively.

ドが変化していることがわかる.

3. 実験装置と実験方法

実験はダブルプラスマ装置を用いて行った. その概略図を **Fig. 3** に示す. 真空容器は長さ 120cm, 直径 70cm のステンレス円筒製容器である. プラズマの閉じ込めのためにカスプ型の磁場配置となっているが, 実験領域では無磁場と見なせる. またターゲットとドライバーは50メッシュのセパーレーショングリッドで仕切られ, 電子のショート効果を防ぎ独立にパラメーターを制御できる. 使用したガスはアルゴンで, (1～2)×10^{-4}torr の範囲で実験を行った. 典型的なプラズマパラメーターは, 電子温度 T_e 1eV, 電子密度 n_e 10^7～10^8cm^{-3} であった.

電子ビームは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 を印加することにより生成され, セパーレーショングリッドを通してターゲットプラズマに打ち込まれる. 電子ビームの電子速度分布関数は, ファラデーカップを用いて測定した.

電子ビーム・プラズマ不安定性により励起された波動の測定は, ビーム方向に可動な表面をセラミックで覆った平板 Langumuir プローブによって, 浮遊電位を測定することによって行った. また, この波の伝播の様子を調べるために干渉法を用いた.

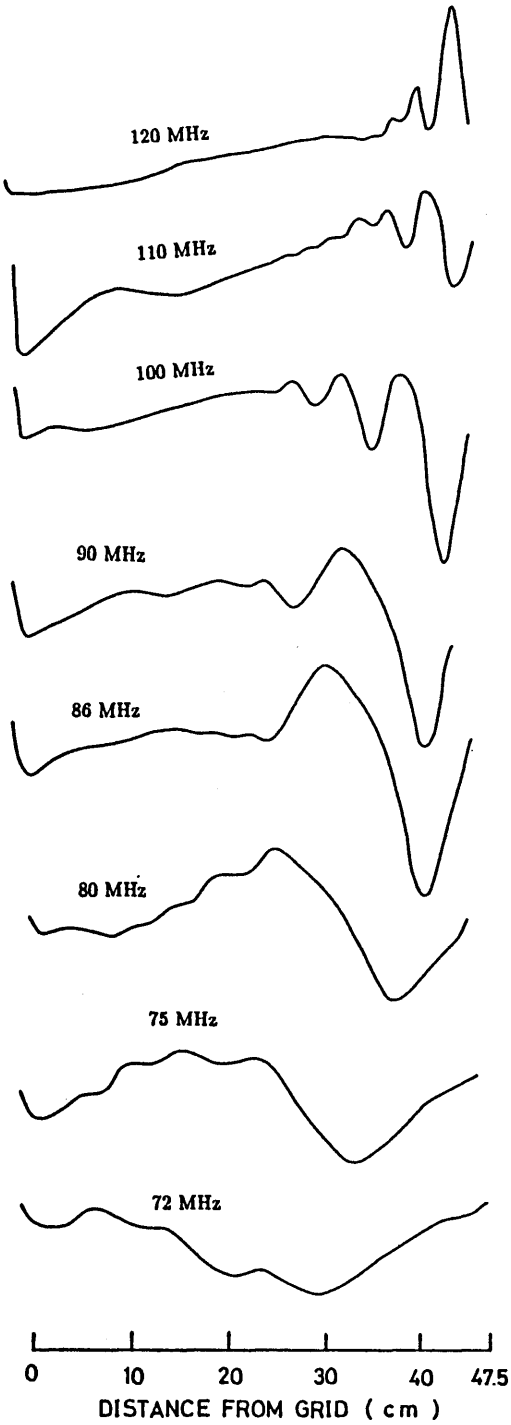

Fig. 4 Interferogram, where f_p≃80MHz.

4. 実験結果と考察

電子ビームプラズマ不安定性により励起された波がどのような分散特性に従うかを調べるために，干渉法により伝播波形を測定した．pump 波の周波数 f_0 を変えて測定した伝播波形を **Fig. 4** に示す．横軸はセパーレーショングリッドからの距離である．このとき，電子プラズマ周波数 f_p は約 80MHz であった．$f_0>f_p$ の場合には，セパーレーショングリッド近くでは波が存在せず，プラズマ中央から壁にかけての領域にのみ波が存在していることがわかる．f_0 が f_p に近づくにつれて波長は大きくなっているが，f_0≒86MHz の場合からわかるように，この波はプラズマ中央から壁にかけての領域にかけてしか存在できないことがわかる．f_0 がさらに小さくなり，f_p＝＝80MHz となると，セパーレーショングリッドからプラズマ中央にかけての領域に，プラズマ中央から壁にかけての領域に励起している波とは波長の異なる波が現れている．

以上の結果を k-ω 空間にプロットしたものが **Fig. 5** である．これにより f_p よりも高い周波数で，壁近くで成長しているのは Langmuir モードの波であることがわかる．また，f_0≒f_p の場合には，セパーレーショングリッド近くではビームモードの波が存在し，壁近くでは Langmuir モードの波が存在していることがわかる．$f_0<f_p$ となる低い周波数では，ビームモード

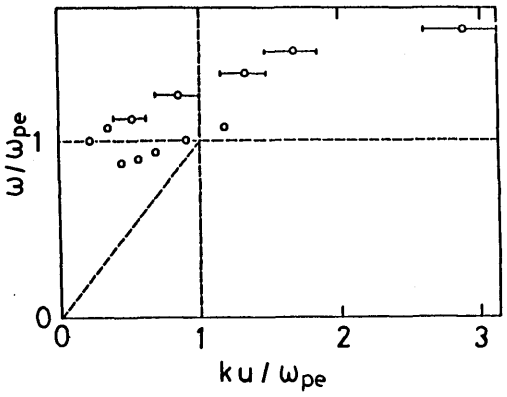

Fig. 5 Dispersion relation.

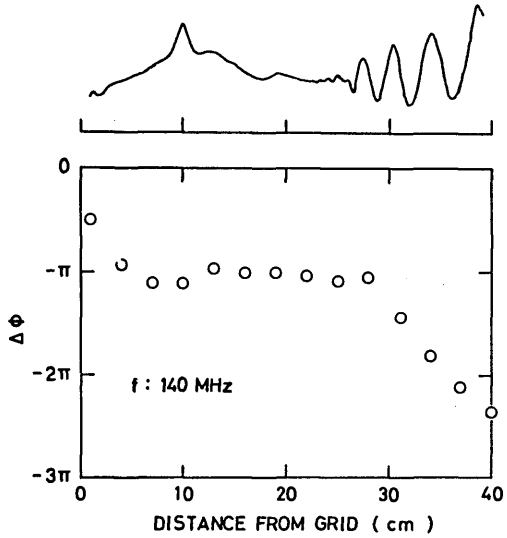

Fig. 6 Spatial profiles of phase difference and the interpherogram where f_0=140MHz.

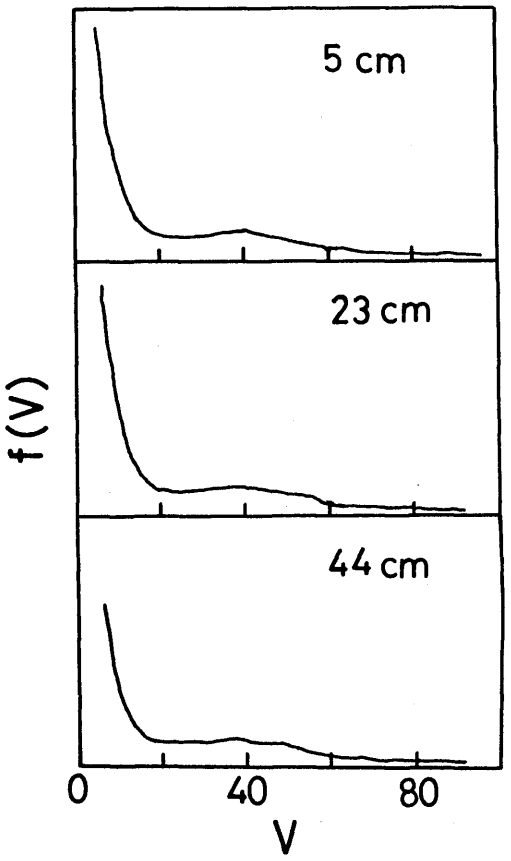

Fig. 7 Measured electron beam distribution function at z=5,23 and 44 cm.

の波のみが存在していることがわかる．また，$f_0>f_p$ において Langmuir モードが成長していることを確認するために，オシロスコープにより波の位相の空間的な変化を測定した．その結果を **Fig. 6** に示す．**Fig. 6** にはこの場合の伝播波形も同時に示している．この Langmuir モードの波はプラズマ中央から壁に向かって成長しながら伝播していることがわかる．

以上の結果により，セパーレーショングリッドからプラズマ中央にかけての領域ではビームモードの波が不安定モードであり，プラズマ中央から壁にかけての領域では Langmuir モードの波が不安定モードであることがわかる．これは，電子ビームがプラズマ中を進んでいくうちに，自分自身の励起した不安定波動や衝突の影響のために電子ビームの速度分布関数が広がりを持つようになり，不安定モードがビームモードから Langmuir モードへと移行したと考えられる．これを確認するために，電子ビームの速度分布関数の空間的変化を測定した．その結果を **Fig. 7** に示す．電子ビームの速度分布関数は，セパーレーショングリッド近くでは比較的きれいな形を保っているが，セパーレーショングリッドから遠ざかるにつれて広がりを持つようになる．電子ビームの密度が $n_B/n_p \sim 0.001$ と非常に小さいため，電子ビームの温度 T_B を正確に決定することは出来なかった．そのため，**Fig. 2** で示した計算結果との定量的な比較は出来なかったが，定性的には理論と一致しているといえる．

5. 結　　論

電子ビームプラズマ不安定性において，電子ビームの速度分布関数が広がりを持つようになると，不安定モードがビームモードから Langmuir モードへと変化することを実験的に初めて観測した．

参 考 文 献

1) B. Bohm, E. P. Gross, Phys. Rev. **75**, 1851 (1949).
2) R. J. Briggs, *Electron-Stream Interaction with Plasmas* (MIT, Cambridge, MA, 1964).
3) T. M. O'Neil, J. H. Malmberg, Phys. Fluids **11**, 1754 (1968).
4) P. McQuillan, K. G. McClements, J. Plasma Physics **40**, 493 (1988).
5) I. H. Cairns, Phys, Fluids B **1**, 204 (1989).