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サブハーモニクスの観測

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

宮下, 豪
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/10.15017/17695

出版情報：九州大学大学院総合理工学報告. 9 (2), pp.205-209, 1988-01-01. 九州大学大学院総合理工学研究科
バージョン：
権利関係：

KYUSHU UNIVERSITY

電子ビーム・プラズマ系における サブハーモニクスの観測

粕谷俊郎*・宮下　豪*・田中雅慶
小森彰夫・河合良信

(昭和62年9月30日受理)

Observation of Subharmonic Wave in an Electron-Beam Plasma System

Toshirou KASUYA, Tsuyoshi MIYASHITA, Masayoshi TANAKA
Akio KOMORI, Yoshinobu KAWAI

Subharmonic wave excitation associated with Langmuir wave in an electron-beam plasma system is studied by using a Double-Plasma device in detail. It is shown that subharmonic waves are excited when the ratio of beam to plasma densities is small. The amplitude of the Langmuir wave is also found to become small with an increase in that of the subharmonics.

1. 緒　　言

ビームプラズマ系における波動現象は，プラズマ加熱との関連もあり，古くから研究が進められている．外部磁場がない電子ビーム・プラズマ系ではラングミュア波が励起されることが知られている[1]．このとき，ビーム密度の高い場合，イオンの運動によって，非線形効果が現れることが Zakhrov[2] により理論的に，また，Wong[3] らにより実験的に調べられている．

電子ビーム・プラズマ系におけるラングミュア波とそのサブハーモニクスに関しては Kawabe ら[4]による報告がある．サブハーモニクスの励起機構に関する研究は，非線形物理学のトピックスとなっているカオスと関連して，プラズマ物理学における重要な研究課題の一つとなっている．カオスの研究は Feigenbaum[5][6] が bifurcation をくりこみ群の方法を用いて定量化して以来，実験的研究が盛んになっている．プラズマの分野では，Boswell[7] が電子ビーム・プラズマ系においてイオンプラズマ周波数の波の bifurcation を観測したという報告がある．また，最近 Wong ら[8]によりプラズマを生成するための放電電圧をパルス的に印加することにより，そのパルスの周波数に関して，bifurcation が観測されたという報告がある．

本論文は，ダブルプラズマ発生装置を用いて，電子ビーム・プラズマ系におけるラングミュア波のサブハーモニクスの励起条件を実験的に詳しく調べることを目的としている．第2章では実験装置と実験方法の説明を行い，第3章では実験結果及び考察を示す，第4章で結論を述べる．

2. 実験装置と実験方法

実験はダブルプラズマ装置を用いて行った．その概略図を **Fig. 1** に示す．真空容器は長さ 120cm, 直径 70cm のステンレス製円筒容器である．真空容器の中には，永久磁石を用いたマルチポール型のカスプミラーが形成されている．ドライバープラズマとターゲットプラズマは，浮遊電位のセパレーショングリッド（50メッシュ）により仕切られており，電子によるショートを防ぎ，それぞれ独立にプラズマパラメーターを制御できる．使用したガスはアルゴンで，$(1\sim2)\times10^{-4}$torr の範囲で実験を行った．

電子温度及び密度は平板ラングミュアプローブ（6mmφ）を用いて測定した．典型的なターゲットプラズマのパラメーターは，電子温度 T_e 1 eV, 密度 n_e $10^7\sim10^8$cm^{-3} であった．

電子ビームは，ドライバープラズマに負の電圧 V_s

高エネルギー物質科学専攻
*高エネルギー物質科学専攻修士課程

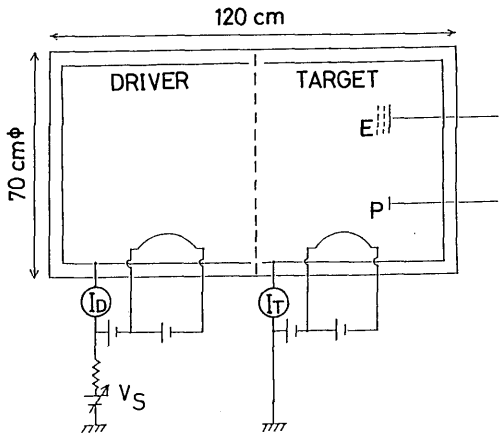

Fig. 1 Schmatic of experimental appratus. E and P represent a retarding energy analyzer and a plane Langmuir probe, respectively.

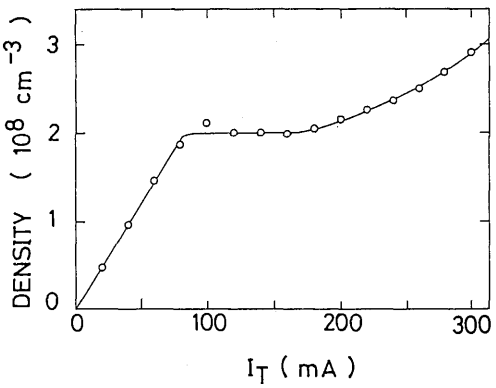

Fig. 2 Plasma dencity as a function of the target discharge current.

を印加することにより生成され，セパレーショングリッドを通してターゲットプラズマに入射される．この時の電子のエネルギー分布関数は静電エネルギーアナライザーにより測定した．**Fig. 1** に示した，放電電流 I_D, I_T を変えることにより，それぞれドライバーとターゲットの密度を制御することができる．**Fig. 2** に I_T とプラズマ密度との関係を示す．I_T が 100mA より小さい領域では，プラズマ密度は I_T に比例しているが，100mA よりも I_T が大きい領域では比例関係は成立していない．本研究では I_T がつねに 100mA より大きいところで実験を行った．電子ビームの密度はドライバープラズマの密度に比例しており，I_D とドライバープラズマ密度との間には **Fig. 2** と同様な関係があるため，実験で用いた I_D が 10～25mA の領域では，ビーム密度は I_D に比例している．

電子ビーム・プラズマ相互作用により励起された波動の測定は，ビーム方向に可動なラングミュアプローブを用いて浮遊電位を測定することにより行った．得られた，電場揺動の周波数スペクトルは周波数分析器を用いて測定した．

3. 実験の結果と考察

電子ビーム・プラズマ系の分散式をビーム密度とプラズマ密度の比（$\zeta = N_b/N_p$）が小さい場合について（$\zeta \ll 1$）解き，最大成長率を与える波の $\mathrm{Re}\,\omega$ を求めると

$$\mathrm{Re}\,\omega = \omega_{pe}\left\{1-\frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}\zeta\right)^{1/3}\right\} \qquad \cdots\cdots(1)$$

となる．ここで，ω_{pe} は電子プラズマ周波数である．この最大成長率を持つ波はラングミュア波と呼ばれている．**Fig. 3** に電子ビーム・プラズマ相互作用により励起された，典型的な電場揺動の周波数スペクトルを示す．周波数が～65MHz の不安定波と～32.5MHz の不安定波が励起していることがわかる．**Fig. 4 a** に周波数～65MHz の不安定波の振幅と振幅の I_D 依存性，つまりビーム密度依存性を示す．この図から周波数は I_D によらず一定であることがわかる．**Fig. 4 a** に示された I_D の領域では，ζ はほぼ一定とみなすことができることから，(1) 式により，理論的にも測定される不安定波の周波数は一定となることが期待される．**Fig. 4 b** に周波数～65MHz の不安定波の I_T 依存性，つまりプラズマ密度依存性を示す．波が観測されるの

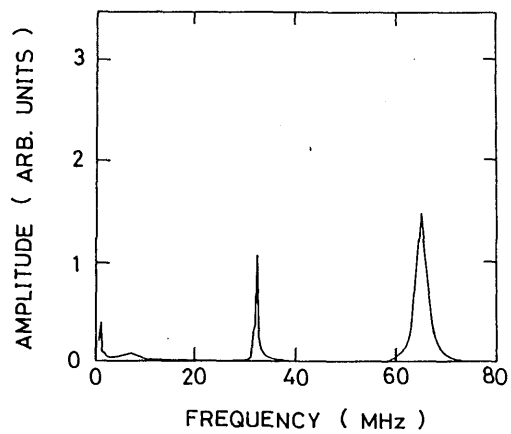

Fig. 3 Frequency spectrum measured at 10cm from the separation grid.

は 100～220mA の領域である．ζはプラズマ密度が高くなると小さくなり，ω_{pe} は密度の 1/2 乗の比例していることから，(1) 式により測定される周波数はプラズマ密度とともに高くなることが期待され，**Fig. 2** に示された傾向と一致している．**Fig. 4 c** に～65MHz の不安定波の V_s 依存性，つまりビーム速度依存性を示す．不安定波が観測されるのは V_s が 80Vs 以上の領域である．測定される周波数は V_s よらず一定であることが期待されるが，実際には V_s に比例して周波数は大きくなっている．これは，電子ビームにより電離が起きてプラズマが生成され，プラズマの密

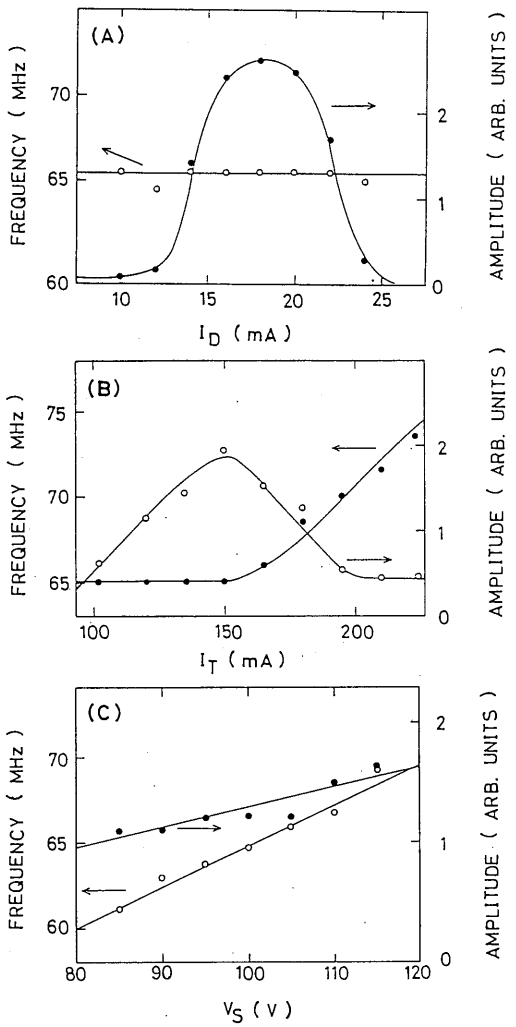

Fig. 4 Dependence of amplitudes and frequencies on the (a) the driver discharge current and (c) V_s.

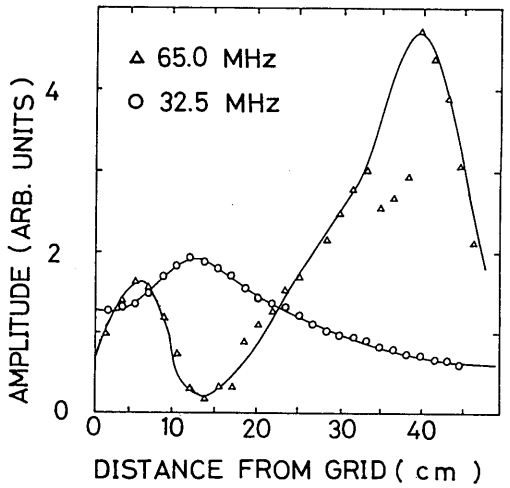

Fig. 5 Spatial profiles of amplitudes of the Langmuir wave and the subharmonics.

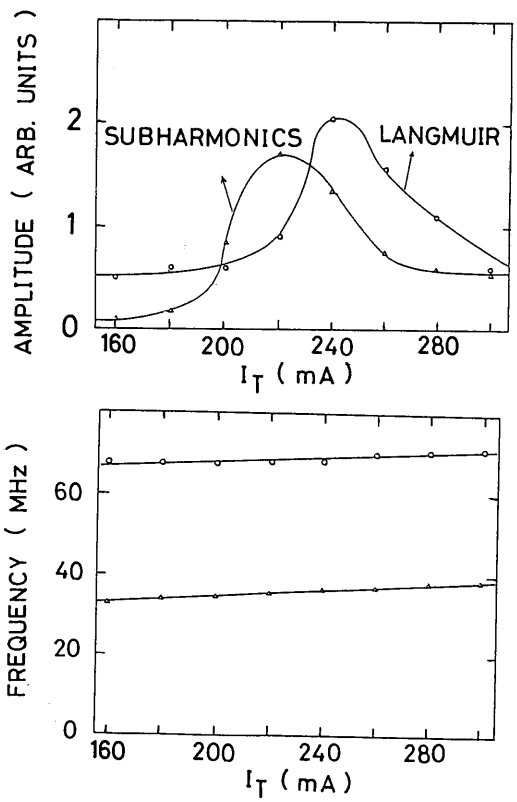

Fig. 6 Amplitudes and frequencies of the Langmuir wave and the subharmonics as a function of the target discharge current.

度が変化したためと考えられる．以上のことから，理論的に期待される周波数変化の傾向は，測定した周波数変化の傾向とよく一致していることがわかる．**Fig. 3** に示した周波数スペクトルを求めたパラメーターを用いて(1)式により，ラングミュア波の周波数を計算すると 75MHz となる．実際に測定された周波数は 65MHz で計算値より若干小さいが，周波数の諸パラメーター依存性が理論と定性的に一致することから～65MHz の不安定波はラングミュア波であると同定できる．

Fig. 3 に示された～32.5MHz の波はその周波数がラングミュア波の周波数の 1/2 であることから，ラングミュア波のサブハーモニクスの可能性がある．**Fig. 5** にラングミュア波とサブハーモニクスの振幅の空間分布を示す．横軸はセパレーショングリッドからの距離である．この図から，ラングミュア波の振幅が大きくなるところではサブハーモニクスの振幅が小さくなり，逆にラングミュア波の振幅が小さくなるところではサブハーモニクスの振幅が大きくなっていることがわかる．従って，ラングミュア波とサブハーモニクスが，エネルギーのやり取りをしている可能性がある．**Fig. 6** にラングミュア波とサブハーモニクスの振幅と周波数の I_T 依存性，つまりプラズマ密度依存性を，また **Fig. 7** に V_s 依存性，つまりビーム速度依存性を示す．これらの図から，ラングミュア波とサブハーモニクスの振幅が大きくなる I_T または V_s の領域がほぼ重なっていること，また，サブハーモニクスの周波数は I_T, あるいは V_s に依存せず，ラングミュア波の周波数のほぼ半分となっていることがわかる．これらの実験結果からも，周波数が～35MHz の不安定波はラングミュア波のサブハーモニクスであることが解る．**Fig. 8** は周波数スペクトルの I_T 依存性，つまりプラズマ密度依存性を示す．70～80MHz の波がラングミュア波である．I_T, つまりプラズマ密度が

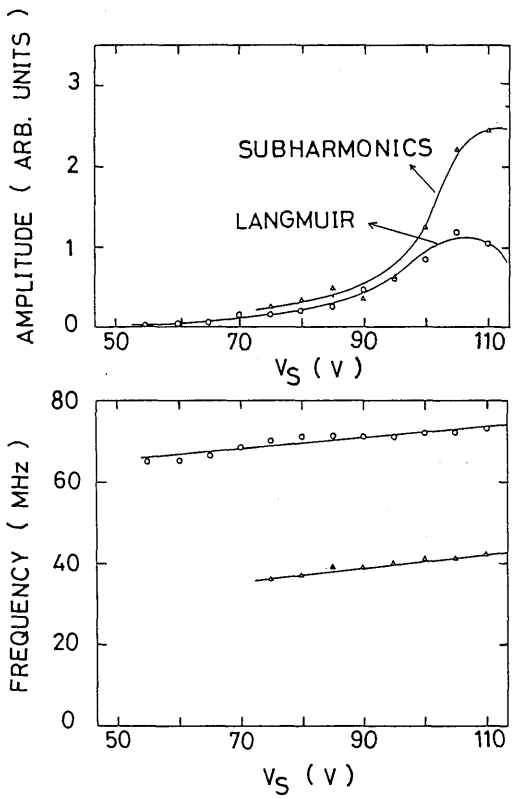

Fig. 7 Amplitudes and frequencies of the Langmuir wave and the subharmonics as a function of V_s.

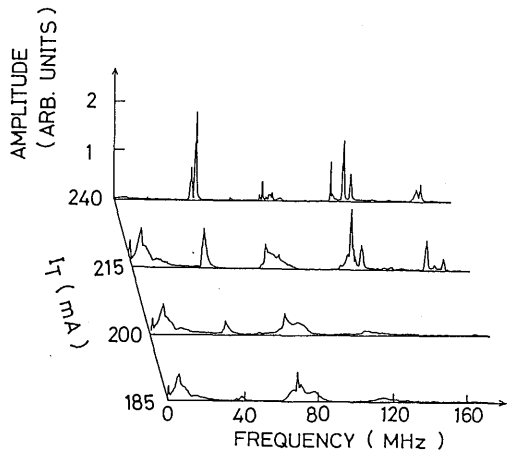

Fig. 8 Dependence of frequency spctra on the target discharge current.

大きくなるにつれ，ブロードなスペクトルが，次第に鋭いピークのスペクトルに変わり，不安定波はいくつかのコヒーレントな波で構成されるようになる．これらのコヒーレントな波の周波数の I_T 依存性，つまりプラズマ密度依存性を **Fig. 9** に示す．ラングミュア波とサブハーモニクスは，プラズマ密度によらずともに類似したコヒーレントな波で構成されていることがわかる．また，I_T が大きくなるにつれ，ラングミュア波の高調波も励起されるようになる．特に，I_T=

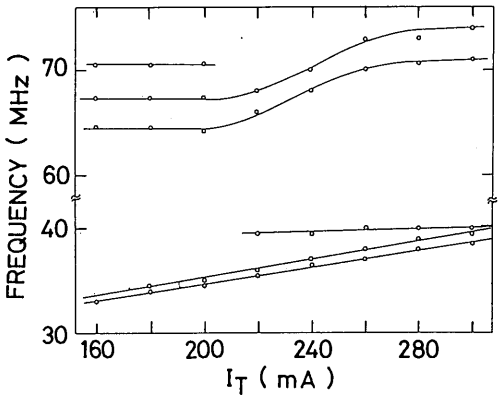

Fig. 9 Dependence of peak frequencies on the target discharge current.

240mA のとき，非常に小さい振幅ではあるが，ラングミュア波のサブハーモニクスのほかに，周波数がラングミュア波の 1/4，3/4 の波も励起されていることがわかる．従って，カオスのピリオドダブリングが起こっている可能性もある．これらの現象の発生機構については現在検討中である．

4. 結　　論

この研究により得られた結果をまとめると次のようになる．

(1) ダブルプラズマ装置を用いて電子ビーム・プラズマ不安定性（ラングミュア波）を観測した．

(2) プラズマパラメーターの制御により，ラングミュア波のサブハーモニクスの励起に成功した．

(3) プラズマ密度が高い場合には，ラングミュア波とサブハーモニクスはいくつかのコヒーレントな波で構成されることがわかった．また，カオスのピリオドダブリングが起こっている可能性のあることを見いだした．

サブハーモニクスの励起機構については現在検討中ではあるが，線形理論では予測されないものであり，何等かの非線形性によるものと考えられる．

参 考 文 献

1) D.Bohm and E. P. Gross, Phys. Rev. **75**, 1864 (1949).
2) V. E. Zakhrov, Sov. Phys. JETP **35**, 908 (1972).
3) P. Y. Cheung and A. Y. Wong, Phys. Fluids. **28**, 1538 (1985).
4) T. Kawabe, S. Kojima and K. Takayama, J. Phys. Soc. Jpn. **20**, 1539 (1965).
5) M. J. Feigenbaum, J. Stal. Phys. **19**, 25 (1978).
6) M. J. Feigenbaum, Phys. Rev. **174A**, 357 (1979).
7) R. W. Boswell, Plasm Physics and Contorolled Fusion **27**, 405 (1985).
8) P. Y. Cheung and A. Y. Wong, Phys. Rev. Lett. **59**, 551 (1987).