

イオンビーム・プラズマ系におけるサブハーモニクス の励起機構の研究

大野, 哲靖
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

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

他

<https://doi.org/10.15017/17680>

出版情報：九州大学大学院総合理工学報告. 9 (1), pp.23-27, 1987-07-25. 九州大学大学院総合理工学
研究科
バージョン：
権利関係：

イオンビーム・プラズマ系におけるサブハーモニクスの 励起機構の研究

大野 哲 靖*・粕谷 俊 郎*・田中 雅 慶
小森 彰 夫・河合 良 信

(昭和62年3月31日受理)

Experiments on Subharmonic Waves in an Ion Beam-Plasma System

Noriyasu OHNO, Toshirou KASUYA, Masayoshi TANAKA
Akio KOMORI, Yoshinobu KAWAI

Subharmonic waves are experimentally studied in detail by applying pump waves to an ion beam-plasma system. It is found that the subharmonic waves are excited in the characteristic region of the pump-wave frequency, accompanied with low-frequency fluctuations. These low-frequency fluctuations are considered to play an important role on excitation of the subharmonics.

1. 緒 言

ビームプラズマ系における波動現象の研究は、プラズマ加熱との関連もあり、理論的にも実験的にも詳しく調べられている。イオンビーム・プラズマ系においては、イオンビーム速度がイオン音波程度の時、イオン-イオン不安定性^{1),2)}が存在するが、イオンビーム速度が大きくなると系は安定となり、三つのモード（イオン音波、ビームの fast モード、ビームの slow モード）が存在することが知られている³⁾。この時、波の振幅が大きくなると波の非線形結合により様々な非線形現象が現われることが報告されている^{4),5)}。Stern ら⁶⁾は線形に安定なイオンビーム・プラズマ系においてビームの slow モードの波（周波数 ω ）が崩壊型不安定性により同じモードのサブハーモニクス（周波数 $\omega/2$ ）を励起することを実験的に観測した。また本沢ら⁷⁾は同様に線形に安定なイオンビーム・プラズマ系においてビームの fast モードのサブハーモニクスの励起に成功している。河野⁸⁾は崩壊型不安定性においてサブハーモニクスが最大の成長率を持つことを理論的に示した。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^{9),10)}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。その結果、流体におけるベナール対流の実験など、様々な分野でカオスが報告されている。プラズマの分野では、Boswell¹¹⁾が電子ビーム・プラズマ系において bifurcation の観測に成功したと発表したが、単に多くの固有モードを同時に観測しただけという可能性があり、bifurcation の検証実験としては不十分である。

イオンビーム・プラズマ系におけるサブハーモニクスの励起機構は、Stern ら、本沢らの研究にもかかわらず明らかではない。本研究は、イオンビーム・プラズマ系において観測される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により、サブハーモニクスの励起機構を明らかにすることを目的としている。

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。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

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

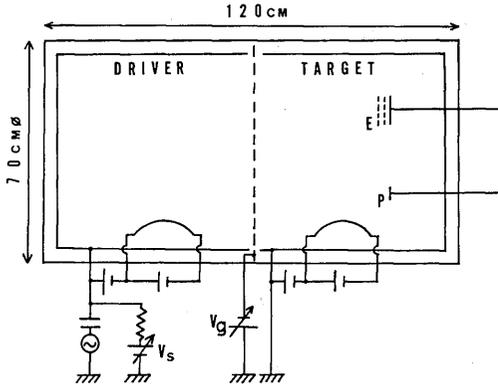


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus. *E* and *P* represent a retarding energy analyzer and a plane Langmuir probe, respectively.

ットプラズマは、負にバイアスされた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、 $(1 \sim 2) \times 10^{-4}$ 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 (15mm ϕ) を用いて測定した。また、イオン温度は静電エネルギーアナライザーを用いて測定した。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 $T_e \approx 1\text{eV}$ 、密度 $n_e \approx 10^8 \sim 10^9 \text{cm}^{-3}$ 、イオン温度 $T_i \approx 0.1\text{eV}$ であった。

イオンビームはドライバープラズマに正の電圧 V 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。この時のイオンのエネルギー分布関数は静電エネルギーアナライザーを用いて測定した。

波動は、高周波電圧 (50kHz \sim 1MHz) をドライバープラズマに印加することにより励起された。波動の測定は可動な平板ラングミュアプローブ (15mm ϕ) を用いて電子飽和電流を検出することにより行った。伝播波形は干渉法により測定された。また密度揺動の周波数スペクトルは周波数分析器を用いて測定された。

3. 実験結果と考察

Fig. 2 にイオンビーム・プラズマ系が線形に安定な場合の分散関係を示す。横軸はデバイ長 λ_d により規格化された波数であり、縦軸はイオンのプラズマ振動

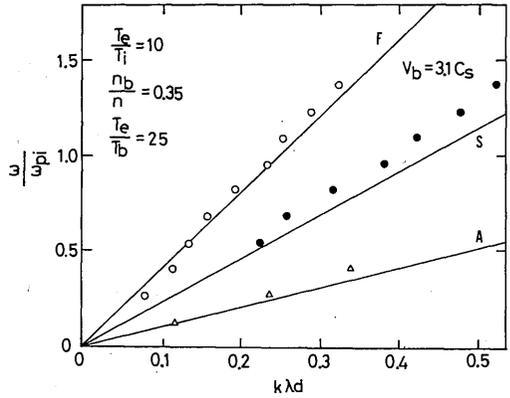


Fig. 2 Normalized dispersion relation for $v_b = 3.1C_s$; Frequency and wavenumber are normalized by the ion plasma frequency and Debye length, respectively. The solid lines show the theoretical predictions; *A*, *F* and *S* are the ion acoustic, fast-beam and slow-beam modes respectively.

数 ω_{pi} により規格化された周波数である。この時、イオンビーム速度 v_b はイオン音速 C_s の3.1倍である。また、実線は理論値である。理論値はイオンビーム・プラズマ系の分散式を数値計算することにより得られた。*A* がイオン音波を、*F* がビームの fast モードを、*S* がビームの slow モードをそれぞれ示している。実験値は理論値とよく一致しており、三つのモードが励起されていることがわかる。

次に、ドライバープラズマに印加する高周波電圧 (ポンプ波) の振幅を大きくし、ビームモードの波 (周波数 ω) の振幅を大きくすると、サブハーモニクス (周波数 $\omega/2$) が励起される。典型的な密度揺動の周波数スペクトルを **Fig. 3** に示す。この場合、ポンプ波の周波数は 640kHz、サブハーモニクスの周波数は 320kHz である。**Fig. 4** はサブハーモニクスの伝播波形を示している。横軸はセパレーショングリッドからの距離である。この伝播波形は2つのモードの干渉パターンを示しており、ビームの fast モードと slow モードに対応しているサブハーモニクスが存在していることがわかる。Stern ら⁶⁾ は slow モードのみが励起されているイオンビーム・プラズマ系において、slow モードの分散に従うサブハーモニクスを観測している。これに対して、本沢ら⁷⁾ は fast モードだけが励起されている系において fast モードの分散に従

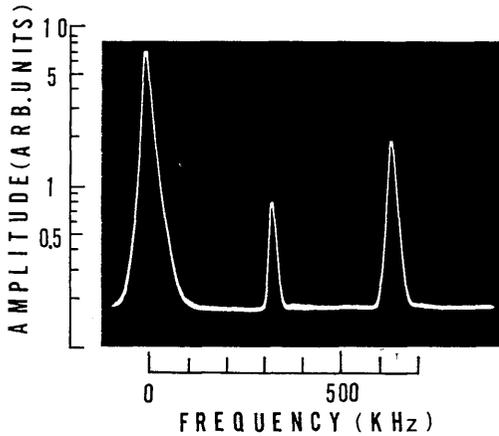


Fig. 3 Frequency spectrum of electron saturation currents, measured at 3 cm from the separation-grid.

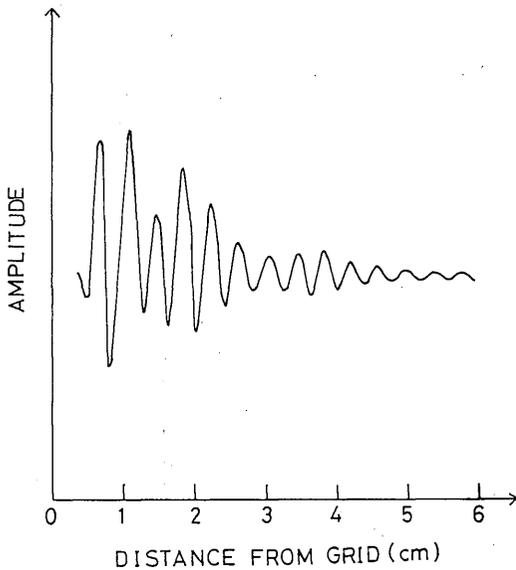


Fig. 4 Spatial wave pattern of subharmonics measured with a coherent detector. The vertical scale is linear.

うサブハーモニクスを観測している。本実験とこれらの実験の結果から、イオンビーム・プラズマ系に励起されるモードの分散式に従うサブハーモニクスが観測されることがわかる。

次に、ポンプ波の周波数に対するサブハーモニクスの振幅の依存性を Fig. 5 に示す。横軸がポンプ波の

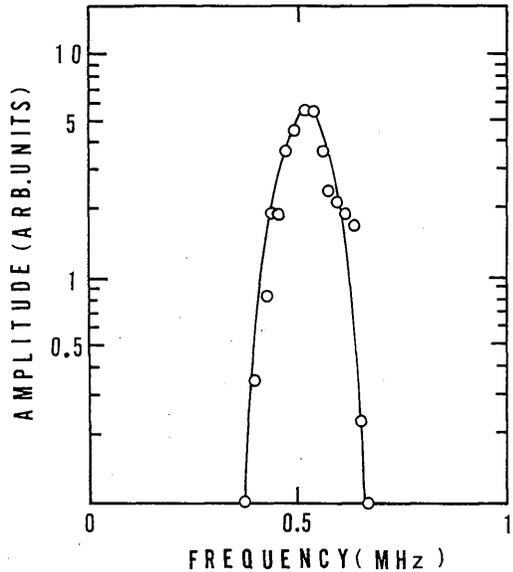


Fig. 5 Wave amplitudes of subharmonics as a function of the pump-wave frequency.

周波数、縦軸がサブハーモニクスの振幅を示している。サブハーモニクスはポンプ波のある周波数領域だけで励起されていることがわかる。Stern ら⁶⁾ は崩壊型不安定性によりサブハーモニクスが励起されると説明しているが、崩壊型不安定性は周波数に依存しないため、Fig. 5 の結果を説明することができない。したがって、サブハーモニクスの励起機構を考える場合、崩壊型不安定性のみを考えたのでは不十分であり、別の新しいモデルが必要である。Fig. 6 はポンプ波の周波数に対する密度揺動の周波数スペクトルの変化を示している。右側の鋭いピークがポンプ波を、左側の鋭いピークがサブハーモニクスをそれぞれ示している。サブハーモニクスが励起されていない場合、低周波部分に揺動が励起されていることがわかる。サブハーモニクスが励起されると低周波揺動の振幅は減少し、サブハーモニクスの振幅が最大となるポンプ波の周波数で、低周波揺動は観測されなくなる。Fig. 7 は、この低周波揺動とサブハーモニクスの振幅の空間分布を示している。低周波揺動の振幅は、セパレーショングリッドから離れるにつれて大きくなり、4 cm で最大となるが、さらに距離が離れると減衰することがわかる (Fig. 7 (a))。一方、サブハーモニクスの振幅もこの低周波揺動と同じ空間分布している (Fig. 7 (b))。これらの結

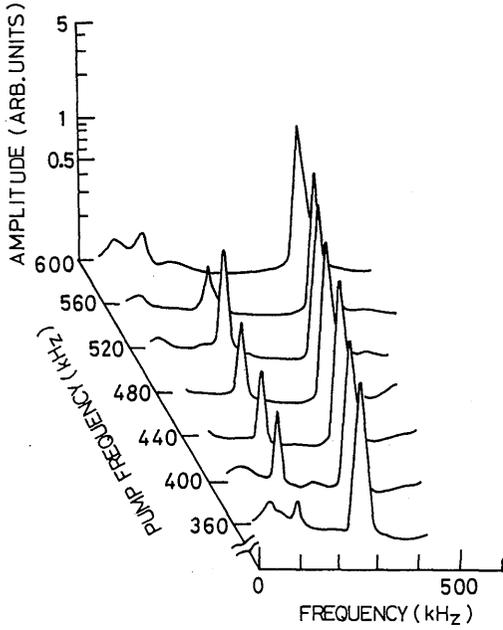


Fig. 6 Dependence of frequency spectra on the pump-wave frequency.

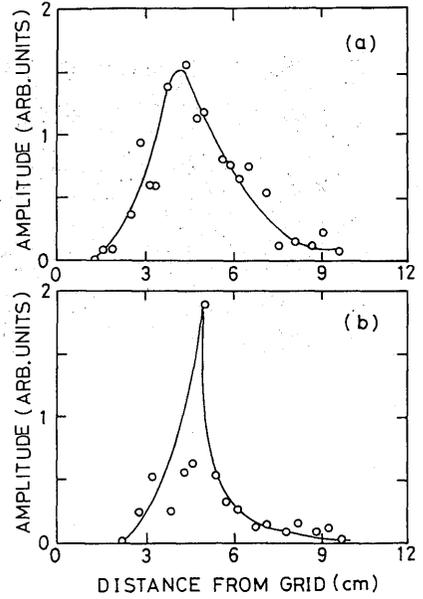


Fig. 7 Spatial distribution of (a) low-frequency fluctuation amplitudes and (b) subharmonic-wave amplitudes.

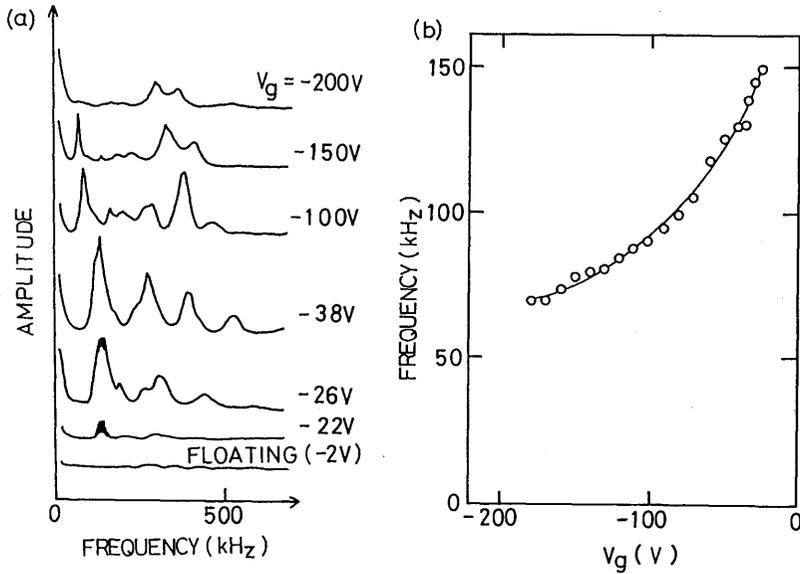


Fig. 8 (a) Dependence of frequency spectra on the bias voltage V_g of the separation-grid. (b) Peak frequencies of low-frequency fluctuations as a function of V_g .

果は、低周波揺動がサブハーモニクスに重要な役割を果たしていることを示唆している。即ち、低周波揺動とビームモードの波との非線形結合によりサブハーモニクスが励起されている可能性がある。従って、サブハーモニクスが励起されるポンプ波の周波数領域は、この低周波揺動の周波数で制限されていると考えられる。このため、低周波揺動の励起機構を知ることは、サブハーモニクスの励起機構の解明のために必要不可欠である。現在、低周波揺動の励起条件を求める実験を進めている。Fig. 8 (a) は低周波揺動のスペクトラムのセパレーショングリッド電位 V_g 依存性を示している。 V_g として負の電位を印加していくと、低周波揺動は励起され始め、その振幅は大きくなり、 $V_g = -38V$ で最大となる。さらに V_g が減少すると低周波揺動は抑えられる。Fig. 8 (b) は、スペクトルの中で最大の振幅をもつ揺動（メインピーク）の周波数の V_g 依存性を示している。メインピークの周波数は V_g の減少とともに小さくなっていくことがわかる。

4. 結 論

この研究により得られた結果をまとめると以下のようになる。

(1) イオンビーム・プラズマ系においてサブハーモニ

クスを励起し、その励起条件を調べた。サブハーモニクスは、ポンプ波のある周波数領域のみで励起されていることがわかった。

(2) サブハーモニクスは、イオンビーム・プラズマ系で励起されているビームモードの分散式にのることがわかった。

(3) 低周波揺動がサブハーモニクスの励起に関与していることがわかった。この低周波揺動とサブハーモニクスの振幅の空間分布は一致している。また、低周波揺動はセパレーショングリッドの電位に依存していることがわかった。

文 献

- 1) Y. Kiwamoto, J. Phys. Soc. Japan, **37**, 466 (1974).
- 2) D. R. Baker, Phys. Rev. Lett. **28**, 1189 (1972).
- 3) D. Grésillon and F. Doveil, Phys. Rev. Lett., **64**, 77 (1975).
- 4) Y. Kawai and M. Kono, Phys. Fluids, **24**, 1056 (1981).
- 5) 河合良信, スペースプラズマ研究会 (1980), p. 6.
- 6) R. A. Stern et al., Phys. Rev. Lett., **32**, 359 (1974).
- 7) T. Honzawa et al., Phys. Fluids, **23**, 98 (1980).
- 8) M. Kono, Phys. Fluids, **28**, 1494 (1984).
- 9) M. J. Feigenbaum, J. Stal. Phys., **19**, 25 (1978).
- 10) M. J. Feigenbaum, Phys. Lett., **174A**, 357 (1979).
- 11) R. W. Boswell, Plasma Physics and Controlled Fusion, **27**, 405 (1985).