# 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 ンーイオン不安定性<sup>1).2)</sup>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<sup>3)</sup>.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<sup>4).5)</sup>. Stern ら<sup>6).</sup>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ω/2)を励起することを実験的に観測した.

また本沢ら<sup>n</sup> 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<sup>8)</sup> 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<sup>9).10)</sup>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、Boswell<sup>11)</sup>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ボール型のカスプミ 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

<sup>\*</sup>高エネルギー物質科学専攻修士課程





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 Ø) 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  $T_c \simeq 1eV$ ,密度  $n_c \simeq 10^8 \sim 10^9 cm^{-3}$ 、イオン温度  $T \simeq 0.1eV$  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 L 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~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∮) 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<sub>4</sub>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  $v_b = 3.1C_i$ , 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 slowbeam modes respectively.

数 $\omega_{pi}$ 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 m はイオン音波速度 C. 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ω/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<sup>6)</sup>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 $^{\eta}$ 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.





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<sup>6)</sup> 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

— 25 —



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  $V_{\delta}$  of the separationgrid. (b) Peak frequencies of low-frequency fluctuations as a function of  $V_{\delta}$ .

昭和62年

果は、低周波揺動がサブハーモニクスの励起に重要な 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 1% 依存性を示 している. Vg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、 Va ≃-381/で最大となる. さらに V₂ 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<sub>8</sub>依存性を示している.メインピークの周波数は V<sub>8</sub> 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).
- R. W. Boswell, Plasma Physics and Controlled Fusion, 27, 405 (1985).