プラズマの線型波動現象－(2)*

－プラズマ波動の励振法－

大沼 俊朗 (東北大学工学部)**

(52年4月15日受理)

第 I 章 プラズマ波動の励振方法

プラズマ物理学の発展は、プラズマ生成技術の発展、プラズマ波動の励振法・測定法の発展と共に進んでおり、その進歩をみれば、プラズマ物理学において、如何にプラズマ生成・波動励振法が重要であったかが分かる。

プラズマ生成に関しては、第III章以下において、有名な実験を紹介しながらその生成法を紹介することとして、本章においては、プラズマ波動の励振に用いられてきた方法を取り上げて紹介しよう。

励振法を大別すると、静電的励振と電磁的励振になるが、ここでは更に、以下の型に分類して説明していく。

1. 単極励振法	6. 不安定性励振法
2. 双極励振法	7. 非線型励振法
3. ループ(コイル)励振法	
4. ダブル・プラズマ法	
5. 変調ビーム法	
5-1. 変調電子ビーム法	
5-2. 変調イオンビーム法	
5-3. 変調電磁ビーム法	
5-4. 変調電流法	

静電的励振には、1～7のすべての方法が属し、電磁的励振には、1と4とを除く他の方法が属している。

* Linear Wave Phenomena in Plasmas

(2) Excitation Method of Plasma Waves

** Toshiro Ohuma (Department of Electrical Engineering,
University, Sendai)

Ⅰ-1 単極励振

Ⅰ-1-1 点源励振

対照とする波動の波長に比して無視出来る程小さなプローブによる励振を点源励振と言ってよい。通常、非常に多用されるものである。一般に、非磁化プラズマ中では波動は等方的に励振されるが、磁場中では、ある特定方向が最大振巾になる指向性をもつ波動の励振がさ

れる場合が多い。ここでは、Ohnuma 等による特徴的実験(文献8)を紹介しよう。

第12図 磁場中プラズマ波の3次元伝搬波用の実験装置図(文献8)

第12図に実験装置図を示す。直径32cm, 長さ160cmの真空チェンバーにて, 封入アルゴンガス圧は程々 6×10^{-4} Torr. プラズマは, チェンバー壁の陽極と4つの陰極を用いて生成され, 代表的密度は $1 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ 電子温度は $T_e \sim 2.0 \text{ eV}$ である。このプラズマ中でイオンプラズマ波の実験を行ない, 励振には直径1mm ϕ , 長さ4mmのプローブが使用され, 波の検出には, 巾5mm長さ1cmの

メッシュを r 方向と θ 方向に可動して使用された。使用周波数は100KHz前後である。まず, 非磁化プラズマ中において, 小プローブにより励振されたイオン波の3次元伝搬特性を, 第12図に示してある検出方法で検出した。その得られた3次元的な位相速度と波の振巾を極座標上に示したのが第13(a)図である。励振されたイオン波は, すべての方向に程々同じ位相速度で伝搬する等方性を示しており, その励振された波動の振巾もすべての方向に程々同じで等方的性質を示している。これは, 等方性媒質の特性であり, 図における実線は理論値を示し, 次式で与えられる。

$$\phi \propto \frac{1}{R} e^{-i(\omega t - KR)}, \quad K = \frac{\omega}{V_s} \quad (65)$$

実験値と理論値とは程々一致している。

次に, 弱磁場を印加した場合のイオン波についての実験結果を示す。第13(b)図に, 検出された位相速度と波の振巾が示されている。位相速度の等方性は, 非磁化プラズマの場合と同様であるが, 励振された波の振巾が磁場方向に非常に大きくなっていることが示されている。実線は理論値で次式で与えられる。

第13図(a)非磁化プラズマ中イオンプラズマ波の3次元伝搬特性。位相速度と波の振巾の実験及び、理論(実線)値。
(b)弱磁場中イオンプラズマ波の3次元伝搬特性。実線, 点線は理論値。

$$\phi \propto (K\ell \cos \theta)^4 \frac{e^{-i(\omega t - KR)}}{R},$$

$$K = \frac{\omega}{V_s} \quad (66)$$

実験値をよく説明している。この内容は、イオン波としては等方性媒質であるが、電子は磁力線にまきつき磁力線方向の運動が容易な異方的性質を有している。このことは、点源励振にもかかわらず、プローブ近傍は双極的性質を有することであり、その相乗効果が、磁場方向が最大振巾になる(66)式のような特徴的現象を現出している。

Ⅱ-1-2 平板励振

非磁化プラズマである等方性プラズマを考えよう。点源励振は、すべての方向に等方的に等振巾に波動が励振される。ある方向により大きな振巾の波動を、磁場を印加する

ことなく励振したい場合は、種々の型の平板励振をすることが一方法である。

イオン波に関する円板励振の実験(文献9)を紹介しよう。実験は、直径30 cm, 高さ~30 cmのベルジャー真空容器中にX_eプラズマ(P₀~10⁻³ Torr)を拡散型にて生成している。代表的電子密度はn₀=10⁸~10¹⁰ cm⁻³, 電子温度はT_e=1 eVであり、装置図は第14図に示してある。波の励振には、直径4.5 cmの銅板、検出には、直径0.46 mm, 長

さ 12 mm のプローブを使用している。

第15図に3次的に測定されたイオン波の振巾特性が、円板の直径 $2a$ とイオン波の波長入との比をパラメーターとして示されている。 $\theta = 0^\circ$ 方向は、円板に垂直方向である。 $\theta = 0^\circ$ 方向により大きな振巾の波が励振されている。実線は理論値で、

第15図 円板励振によるイオン波の3次元振巾特性。直径は $2a$

第14図 平板励振によるイオン波の実験装置 (文献9)

$$\phi \propto \frac{J_1(Ka \sin \theta)}{Ka \sin \theta} \quad (67)$$

にて与えられる。 a は円板の半径である。

Ⅱ-1-3 グリット励振

イオンプラズマ波にHatta等(文献10)にて使用されたグリット励振は、イオン波励振に関しては本質的に平板励振と同じである。しかし、グリット励振は、擬似波を励振し易いと指摘され(文献47)、実験においては注意を払う必要がある。電子波の場合は、電磁波成分を少なくするため、カゴ型にシールドされたグリット励振も使用されている(文献32)。

ここでは、グリットが波動を通過させ易いことと反射効果とを利用したダブルグリット

励振の実験 (文献 11) を紹介しよう。実験装置は I-1-1 の場合と同じである。第 16 図の様に、2 板の円板グリットを平行に並べ、一枚 (V_E) には特定周波数のを外部印加し、他の一枚 (V_R) には単にバイアスを印加し、 V_E グリットによる波の 3 次元振巾特性を制御する。第 17 図に V_R の効果を示した実験例が示してある。図には、 V_E にて励振された波が、 V_R による反射波も加わって波の振巾が程々 2 倍になっていることが示されている。 $V_R = -50\text{ V}$ が反射波のない例で、 $V_R = 40\text{ V}$ が程々完全反射波の存在する場合である。

第 16 図 イオン波の 3 次元放射特性の制御用ダブル・グリット (文献 11)

これらの振巾特性を 3 次元的に測定した結果が、第 18 図に示されている。 $2a/\lambda$ がパラメータとして選ばれ、 V_R による反射特性により、一方向により大きな波動が行なわれていることが示されている (○ ○ 反射なし、● ● 反射あり)。点線は、反射のない場合の理論値で、

第 17 図 イオン波の反射波による相乗効果にて増大する振巾

(67) 式と同じである。実線は、反射のある場合の理論値で、次式で与えられる。

$$\phi \propto \left\{ 1 + e^{i(KD \cos \theta + \phi)} \right\} \frac{J_1(Ka \sin \theta)}{Ka \sin \theta} \quad (68)$$

ここに、 D はグリッド間隔で、 ϕ は励起波と反射波との位相差である。この様に、反射板を用いることにより、ある方向により大きな波を励振することが出来る。又、この実験は、電子飽和ソースによりイオン波が反射されることを示した明確な実験でもある。

Ⅱ-2 双極励振

双極（ダイポール）は、本質的に電磁波動の励振に有効であるが、静電波動励振にも使用される。第19図には、Stenzelが電磁波動であるホイスラー波励振に用いたダイポール¹⁶と、

第18図 反射波により制御されたイオン波の3次元放射特性。●●反射あり，○○反射なし。

プラズマの線型波動現象 — (2) — プラズマ波動の励振法 —

静電波動であるイオン波励振に使用されたダイポール¹²とを示している。ここでは、Ⅱ-1の場合と同様に、イオン波励振について紹介しよう。第19図の様に、長さ $2L (= 3 \text{ cm})$ のダイポールにて行なわれた。実験装置はⅡ-1-1と同じチェンバーが使用され、3次元的に伝搬する波動の振巾特性を測定し、その実験結果を第20図に示す。ダイポールの長さ $2L$ と波長 λ との比がパラメーターに選ばれている。 $2L/\lambda$ が小さい時は、 $\theta = 0^\circ$ 方向（第19図参照）に波動より大きく励振されている。 $2L/\lambda$ の値が大きい時は、 $\theta = 90^\circ$ に近い方向に波動が大きく励振れ、 $\theta = 0^\circ$ 方向は小さく

なっている。実線は理論値で、

$$\phi(\theta) \propto \frac{\cos(KL \cos \theta - 1)}{\cos \theta} \quad (69)$$

で与えられるものである。ダイポール励振は、図からも分かる様に、ダイポール長 $2L$ と対称とする波の波長 λ との比を変化させることにより、波の最大励振方向を $\theta = 0^\circ$ 方向から $\theta = 90^\circ$ 方向へと大きく変化させることが出来る。この傾向は、電子プラズマ波等の他のプラズマ波動においても同様である。

Ⅱ-3 ループ（コイル）励振

ループを使用する場合は、電磁的、及び、静電的に励起する方法があるが、電磁的に励振する方法が多く使用されてきた。イオンサイクロトロン波を励振するために用いられた Stix

第19図 ホイスラー用ダイポール（文献16）
（上）とイオン波用ダイポール（文献12）（下）

大沼

第2.0図 ダイポール励振されたイオン波振巾の角度特性 (文献12)

コイル (文献13) は特に有名であり, Little はイオン波励振にコイルを用いて成功し (文献14.), Belan と Porkalab はローアハイブリット波の励振に (文献15), Stenzel はホイスラー波にループを使用し, アルベン波に対しても Jephcott 等がループ励振を使用している (文献17)。この方法は, ループに変動電流を流し, それにより出来る変動磁場を利用するもので, プラズマ中にループを挿入しないで使用出来る利点があり, 多用されている。

第2.1図に有名な Stix コイルを示す。Stix は, これをステラレータ装置に取り付け, イオンサイクロトロン共鳴加熱の実験を行なっている。又, このコイルより入る RF 電力に対するプラズマのローディング等に関して, 文献1に詳細されている。この型を変形して, Belan 等がローアハイブリット波の多ループ励振に使用したものを第2.2図に示す。相隣るループに対し逆相の電力を印加して, 有効に有限の $K_{||}$ を与えている。第2.3図に, Stenzel がホイスラー波用に使用したループを示してある。

静電的ループ励振の例を, イオン波の場合について述べてみよう^{18 A}。第2.4図に使用されたループの2つの例を示してある。実験は 1-1-1 と同じ装置にて行なわれた。ここで, ループは絶縁されておりプラズマ電流が流れない様にしてある。まず (A) の場合, これは前述の平板励振と同型の単極励振であり, その

実験結果を第2.5図に示す。平板励振に類似していることがわかる。実線は理論値で,

$$\phi(\theta) \propto J_0(Ka \sin \theta) \quad (70)$$

で与えられる。次に (B) の場合を考えよう。近似的には前述のダイポール励振に同じであり, ループ直径 d と波長 λ との比が非常に小さい場合には微少ダイポールと同じになる。¹⁸

第 21 図 イオンサイクロトロン波励振用の Stix コイル (文献 13)

第 22 図 ローアハイブリット波励振用の多ループ (文献 15)

その時の理論値は,

$$\phi(\theta) \propto \cos \theta \quad (71)$$

より詳しくは,

$$\phi(\theta) \propto H_0 (K a \sin \theta) \quad (72)$$

第 23 図 ホイスラー波用のループ
(文献 16)

である。実験例を, 第 26 A, B 図に示す。

Ⅱ-4 ダブル・プラズマ法

カリフォルニア大学(UCLA)⁴⁰にて開発されたダブル・プラズマを用いた波動の研究は、大振幅のプラズマ波の実験、例えば、イオン波ソリトンの検出、等に大きな貢献を示してきた。更に、イオンビームの実験¹⁹に発展している。

第27図に、Taylor 等により使用された実験装置を示している。電位的に互いに独立な2つのプラズマを生成することがその本質である。真空チェンバーの内側に多

第24図 イオン波励振用ループ、左はリング型、右はダイポール型

第25図 イオン波のリング型ループ励振による3次元振巾特性、実線は理論値で、●●は実験値

数のヒラメントをめぐらし、外壁をアノード、ヒラメントをカソードにして中央部に電子ビームを放出し、中央部に静かな均一なプラズマを生成する。中央の負バイアスのグリッドにて電子の左右の往来を疎止して、右側のテスト・プラズマに、左側のソース・プラズマ中のイオンを注入して右側の領域に摂動を与える。右側に注入する左からのイオンの量を一定の

第26A図 微小ダイポール型ループ励振によるイオン波の振巾角度特性

第26B図 有限ダイポール型ループ励振による電子プラズマ波の振巾角度特性

第27図 ダブル・プラズマ (文献40)

第28図 簡便なダブル・プラズマ

第29図 プラズマ波の開口面励振

周波数にて変動を与えることにより，テスト・プラズマ中に任意の周波数の波動を励振することが出来る。左側のソース・プラズマの密度を大きくすることにより，波動の変動を大きくすることが出来，大振幅の波動を励振することが出来る。両者に電位差を大きく与えることにより，イオンビーム・プラズマの実験にもなり，更に中央部のバイアスを逆にすることにより，電子ビーム・プラズマの実験にも使用出来る。UCLAの実験装置は優れたものであるが，フィラメントの構成やその電源容量の大きさ等に複雑な点がある。より簡単なダブル・プラズマ¹⁹にても，同様

の実験を行うことが出来る。第28図にその代表例を示す。図の様に，アノードとカソードを2対を用意すればよく，前例より簡便であり小型化が可能である。

中央部グリットが大きい時には平面波（一次元波動）が励振されるが，このグリットの変わりに，第2の図の様な小孔（open aperture）をもつ板にしてみよう。この開口はデバイ長より大きい場合には，電子の往来等を疎止するためにグリット等を使用する必要がある。今，直

第30図 開口面励振されたイオン波の波面 (A) と振巾 (B), 実線は理論値で, ●●印は実験値

径2cmの開口面によるイオン波の励振を考えよう。これにて励振される波動を3次的に測定すると、波面は第30Aの如く球面状に伝搬していることが分かる。励起された波動の振巾の指向性の1例を30B図に示してある。ある方向に大きな振巾の波動の励振がされていることが示されている。第30図の実線は理論値で、

$$\phi(\theta) \propto \frac{J_1(Ka \sin \theta)}{Ka \sin \theta} e^{-i(\omega t - KR)} \quad (73)$$

にて与えられる。このダブル・プラズマにて開口面励振を行うことにより、大振巾の波動を球面波にてある方向に指向させれることを示している。

I-5 変調ビーム法

変調ビーム法は、任意の周波数にて変調された電子ビーム、イオンビーム、あるいは、電磁ビームをプラズマに注入することにより、プラズマ波動を励振する方法である。導体をプラズマに接触させな

くても波動励振出来ることが最大の特徴であるが、変調荷電粒子ビームの場合の利点を列挙してみると、(1)高温プラズマ中でも使用可能である。(2)導体系を挿入する必要がなく、プラズマ定常態の攪乱が少ない。(3)小形化が可能であり、人工衛星などへのとり載に便利である。(4)粒子が直接プラズマ波と結合するので、励起効率がよい。(5)疑似波を励起し難い。(1)から(3)までは、電磁ビームの場合にも利点になっている。

Ⅱ-5-1 変調電子ビーム法

Ohnuma 等により開発された変調電子ビーム法を紹介しよう(文献20)。この方法は種々のプラズマ波動の励振に使用されており、電子プラズマ波(文献20)、イオンプラズマ波(文献21)、電子バーンシュタイン波(文献22)、イオンバーンシュタイン波(文献23)、等の励振・伝搬の機構が明確になっている。

第31図 変調ビームによるプラズマ波動の励振

ここでは、電子プラズマ波の励振について解説する。実験配置図を第31図に示す。プラズマに密度変調電子ビームを注入することにより、ビームに任意の角度方向に波の励振が行なわれる。ビームの形状は、シート状、あるいは、円柱型が使用され易く、変調されたビーム領域においての荷電粒子密度の時間的変動により、ビーム外領域にプラズマ特有の波を励振する。第32A図に、プラズマ中に注入された電子ビームの空間的分布が示されている。電子ビーム速度がパラメータとして選ばれており、その分布は、ビーム源領域のビームの集束効果にて大きく影響される。この変調ビームに

程々垂直方向に電子プラズマ波が励振され、その代表例を第32-B図に示す。ビームの変調周波数を変化した場合、励振された波動の分散特性は、プラズマ特有の性質(ここでは、電子プラズマ波)を有している。この励振された電子プラズマ波の変動密度 n は、理論的に、円筒ビームの場合次式で与えられる。

$$n(R, Z) = \frac{(1-i)\rho\sqrt{\pi}}{2} \frac{aJ_1(K'_{\perp})}{K'^{3/2}_{\perp} R^{1/2}} e^{-i(\omega t - K'R - K_{\parallel}Z)}, \quad K' = (K^2 - K_{\parallel}^2)^{1/2} \quad (74)$$

プラズマの線型波動現象 — (2) — プラズマ波動の励振法 —

第3 2 図 プラズマ中における電子
ビーム分布と励振された
電子プラズマ波

ここに、 J_1 はベッセル関数、 a はビーム半径、 K は励振されるプラズマ波数、 $K_{||} = \omega / V_0$ はビーム速度に決められるビーム方向の波数、 R は励振点より観測点までの距離を示す。(74) 式は、遠方解であるが、振巾は $R^{-1/2}$ に比例する幾何学的減衰を示している。又、シート・ビーム (高さ $2a$ 、巾 $2b$) の場合は

$$n(R, Z) = \frac{(1-i)\rho}{(\pi K'R)^{1/2}} \frac{\sin(K'a \sin \theta)}{K' \sin \theta} \frac{\sin(K'b \cos \theta)}{K' \cos \theta} e^{-i(\omega t - K'R - K_{||}Z)},$$

$$K' = (K^2 - K_{||}^2)^{1/2} \quad (75)$$

で与えられる。これは、(74) 式と同様に幾何学的減衰項 $R^{-1/2}$ を含んでいる。

又、(74) (75) 式は、励振される波動の伝搬方向がビーム速度で制御されることも含んでおり、その様子を円柱ビームの例において第 3 3 図に示す。 V_s をプラズマ波動の位相速度と考えよう。ビーム速度がその位相速度よりはるかに大きい場合、即ち、 $V_0 \gg V_s$ はビームに程々垂直方向に波動が励振され、 V_s が V_0 に比

して無視出来ない場合には、ビームに斜め伝搬の波動が励振されることが示されている。

■ - 5 - 2 変調イオンビーム法

変調イオンビームによるイオンプラズマ波の励振 (文献 2 4) について解説しよう。イオンビーム励振による場合は、電子ビームの場合に本質的に類似している点が多い。密度変調されたイオンビームにより励振されたイオン音波の波形例を第 3 4 A 図に示してある。変調周波数を変化させることにより波長の変化が示され、これらの波形によりイオン波の分散特性を満たしていることが分かる。第 3 4 B 図は、ビーム中の変動電位 ϕ_b が、プラズマ中の

大沼

第33図 変調ビームにより励振されるプラズマ波の波面。
波の位相速度 V_s とビーム速度 V_0 との比がパラメータ。

波動電位 ϕ にどの様に移行していくかが示されている，めずらしい波形が示されている。第35図には，第34B図等の実験結果より得られる波動の励振効率 ϕ/ϕ_b と励振周波数との関係を示したものである。理論的には，円柱イオンビームの場合

$$\phi(R, Z) \propto \frac{(j\omega S_b - \omega^2 N_b)}{-\omega^2 + \omega_{pi}^2}$$

$$\frac{a J_1(K'a)}{K'^{3/2} R^{1/2}} e^{-i(\omega t - K'R - K_{||}Z)},$$

$$K' = (K^2 - K_{||}^2)^{1/2} \quad (76)$$

にて与えられる。電子ビームの場合と違って，荷電粒子密度変動成分 N_b の他に，荷電転移 (charge transfer) により生成された静止イオンの効果 S_b も導入してある。第35図に示してある理論値，実線，及び，点線は，(76)にて得られたもので，実線は， S_b の効果を示すもので，点線は N_b の効果を示すものである。実験結果は， N_b の効果より S_b の効果が大きく効いていることがよく示されている。

Ⅱ-5-3 変調電磁ビーム法

前節までの荷電粒子ビームの代わりに電磁波を用いる場合もあり，これを変調電磁ビーム法と呼ぼう。変調したマイクロ波をプラズマに照射して波動を励振する方法は古くから行なわれているが，最近では，Tsukishima 等によるイオン波の励振 (文献25) がある。第36図は

第34図 変調イオンビーム励振されたイオン波(A)と，
ビーム中のポテンシャルと波動との関係(B)

Tsukishima 等が散乱の実験に用いた装置図であるが，この照射マイクロ波を電力変調することにより波動の励振が行なわれる。この場合は，電磁波とプラズマとの結合効率が問題であろう。

■ - 5 - 4 変調電流法

電流を任意に変調して波動を励振する方法は多くは用いられていないが，パルス電流を局

第 35 図 ビーム中電圧と波動電位に対する周波数との関係

所的に流すことにより波動を励振する場合がある。この励振法は変調電流法と呼んでおこう。アルペン波の最初の人工励振の成功は、この方法にて行なわれている（文献 26）。即ち、

第 37 図に示されている様に、内部導体と外部導体との間に瞬時の電流を流すことにより局在する変動磁場を生成して、アルペン波の励振に成功している（第 116 図も参照）。

第 36 図 マイクロ波照射実験装置

Ⅱ-6 不安定性励振法

プラズマ中の不安定現象は，数多くのプラズマ波動において，種々の条件の基に起り得る（文献27）。この不安定性を局在させて波動の励振に用いる方法がある。

プラズマを不安定状態にした場合，単色の振動（又は，波動）が励振される場合と複数の波動が同時に不安定になる場合があるが，波動の励振には前者が使用し易い。この方法を用いて，Motley と D'Angelo は中性イオンバーンシュタイン波（静電イオンサイクロトロン波）の励振・検出に成功している（文献28）。第38図に示されている様に，局所的に電流を流し，その電流領域において不安定状態になった波動の変動が外部に伝搬していく。この方法は，不安定領域のモード（波長，周波数）が明確になっている場合の他は複雑で使用しにくい。

第37図 アルベン波励振用のパルス電流配置（文献26）

第38図 不安定性を利用した中性イオンバーンシュタイン波の励振装置（文献28）

Ⅰ-7 非線型励振

プラズマの非線型現象を利用してプラズマ波動を励振する場合である。特に、外部印加周波数とは異なった周波数の波動を励振したい場合、例えば、印加周波数 ω に対して高調波の 2ω の波動を励振する時(文献29)、印加周波数 ω_1 、 ω_2 にて、 $\omega_1 \pm \omega_2$ の波動を励振したい場合(文献30)などである。更に、横波(電磁波)を入れて電子波とイオン波の縦波等を励振したい場合(文献31)などのダイケイ不安定性を利用したり出来る。

ここでは、1例として、イオン波を取上げる。印加周波数 ω

第40図 基本波と第2次高調波の振巾関係

第39図 基本イオン波の振巾変化に対する第2次高調イオン波の振巾特性

に対してその高調波 2ω の波動の励振について紹介しよう(文献29)。Ⅰ-1-1の実験条件に近い条件の基に実験されている。第39図に印加周波数 f に対して、 $2f$ の信号振巾の場所的变化を、 f の励振電圧 V_f を変化させた場合において示してある。 $2f$ 信号がある空間領域にて最大振巾を示している。即ち、印加信号 f に対して、 $2f$ の信号を励振したことを示している。第40図に、 f の大振巾励振において、 f 信号と $2f$ 信号とが

プラズマの線型波動現象 - (2) - プラズマ波動の励振法 -

波動エネルギー交換をしていることが示されている。このことは， f 信号と $2f$ 信号の振巾交換が行なわれていることで， $2f$ 信号を自由に制御出来ることを示している。

以下，第3部の静電波動の実験的検証に続く。

参 考 文 献

1. T.H.Stix, The Theory of Plasma Waves, McGraw-Hill, 1962
2. W.P.Allis, S.J.Buchsbaum and A.Bers, Waves in Anisotropic Plasmas, MIT Press, 1963
3. A.M.A.Leontovich, Review of Plasma Physics vol. 1 ~ 6
4. J.G.Lominadge, Cyclotron Waves in Plasmas, 1975
5. 大沼俊朗 プラズマの線型現象，プラズマ若手夏の学校テキスト，1976
6. A.Krall and A.W.Trivelpiece, Principles of Plasma Physics, McGraw-Hill, 1973
7. H.Alfven and C.G.Fälthammer, Cosmical Electrodynamics, Oxford at the clarendon Press, 1963
8. T.Ohnuma et al Phys. Rev. A 12, 1648(1975)
9. K.Shen, S.Aksornkitti, H.C.S.Hsuan, and K.E.Lomngren, Radio Science 5, 611 (1970)
10. Y.Hatta and N.Sato, Proc. of the Fifth Int. Conf. On Ionization Phenomena in Gases, Munich 1961, North Holland 1962, P.478
11. T.Ohnuma, Y.Tamura, T.Fujita and S.Adachi, Radio Science 9, 697 (1974)
12. T.Ohnuma et al, IEEE Trans. AP Dec. 1976
13. T.H.Stix, and R.W.Palladino, PhyFluids 1, 446 (1958)
14. P.F.Little, Proc. of the Fifth Int. Conf. on Ionization Phenomena in Gases, Munich 1961, (North Holland 1962) P. 1440
15. P.Bellan and M.Porkalab, Phys. Rev. Lett. 34, 857 (1975)
16. R.L.Stenzel, Phys. Fluids 19, 857 (1976)
17. D.F.Jephcott and A.Malein, Proc. Roy. Soc. A 278, 243 (1964)

大沼

18. T.Ohnuma, H.Iwasaki, S.Adachi, Togo, to be published;
S.Ohunki, S.Adachi and T.Ohnuma, to be published.
19. 例えば, T.Ohnuma and T.Fujita, Phys. Fluids 16, 2026 (1973)
20. T.Ohnuma et al Phys. Rev. Lett. 32, 820 (1974)
21. T.Ohnuma, T.Fujita, K.Shibata and S.Adachi,
Phys. Fluids 18, 1818 (1975)
22. T.Ohnuma et al Radio Science 10, 1071 (1975)
23. 柴田 寛 他 スペースプラズマ研究会 1975
24. T.Ohnuma et al Phys. Rev. Lett. 31, 1177 (1973)
25. T.Tsukishima, T.Yamamoto and Y. Nishio,
J.Phys. Soc. Japan 37, 1719 (1974)
26. T.K.Allen, W.R.Baker, R.V.Pyle and J.M.Wilcox,
Phys. Rev. Lett. 2, 383 (1959)
27. 例えば, T.Ohnuma et al Phys. Rev. Lett 36, 471 (1976):
T.Fujita, T.Ohnuma and S.Adachi, Phys. Fluids 18, 1216 (1975)
28. R.W.Motley and N.D'Angelo, Phys. Fluids 6, 296 (1963)
29. T.Ohnuma et al Phys. Rev. A 8, 1002 (1973)
30. T.Ohnuma and Y.Hatta, Phys. Fluid 13, 1416 (1970);
J.Phys. Soc. Japan 29, 1597 (1970)
31. H.C.Kim, R.I.Stenzel and A.Y.Wong, Phys. Rev. Lett, 33, 886
(1974)
H.Ikezi, K.Nishikawa and K.Mima, J.Phys. Soc. Japan 37, 766
(1974)