

スペースチェンバにおける電子波の伝播

河合良信*・池沢俊治郎†・原民夫‡
中村良治・伊藤富造・河辺隆也#

Propagation of Electron Waves in Space Chamber

By

Yoshinobu KAWAI, Shunjiro IKEZAWA, Tamio HARA,

Yoshiharu NAKAMURA, Tomizo ITOH and Takaya KAWABE

Abstract : Propagation of electron waves in a space chamber was studied using glow mode plasma source which produced a uniform collisionless plasma in the space chamber. The electron waves were excited by the three-grids-antenna fed by the continuous RF field. The electron waves are observed and classified into four kinds: (1) fundamental Landau mode (L.W.) for $\omega > \omega_p$ (ω_p : electron plasma frequency), (2) free-streaming mode (F.S.), (3) higher-order L.W. and (4) beam mode, for $\omega < \omega_p$.

概 要

グローモードプラズマ源を用いて、スペースチャンバ内に無衝突一様プラズマを生成し、連続高周波を3枚グリッドに印加して電子波を励起し伝播の実験を行った。 $\omega > \omega_p$ (ω_p : 電子プラズマ周波数)では(1) Landau mode (以下L. W. と記す)の基本波、 $\omega < \omega_p$ では(2) Free-streaming (F.S.), (3) 高次のL. W. (4) Beam mode とが観測された。

1. ま え が き

電子波の伝播の基礎実験では、まずその分散関係を得るため無限大一様プラズマが必要となる[1]。このことは静電波用アンテナの実験においても同様である[2]。このため本研究では東京大学宇宙航空研究所の大型チェンバにグローモードプラズマ源を設置して電子波の伝播実験を行った。

電子波は上述の(1)~(4)に大別され、Landau減衰の検証以来、多くの研究がなされた[3][4][5]。特にF.S.[4]とBeam mode[5]は擬以波と呼ばれ、(1)(4)のLandau modeと区別される。このうち(1)のL. W.は既に詳しく研究されている[6]。そこで我々は未だ明らかにされていなかった(2)~(4)の電子波の伝播について研究してきた。

* 九州大学応用力学研究所

† 中部工業大学

‡ 名古屋大学プラズマ研究所

筑波大学

実験ではこれらの電子波が観測できるように、励起効率の大きい基本波を除くため $\omega < \omega_p$ の領域で実験した。本論文では伝播特性、特に分散関係及び位相速度を中心にして整理したので衝突の効果と波の振巾が大きい場合については各々の論文を参照されたい[19][20]。

2. 伝播特性の計算

無限大、無衝突プラズマであるとし、ダイポール励起を仮定する。電子がマックスウェル分布をしているプラズマ中の電子波の電界 $E(\omega, X)$ は次式で記述される [7][8]。

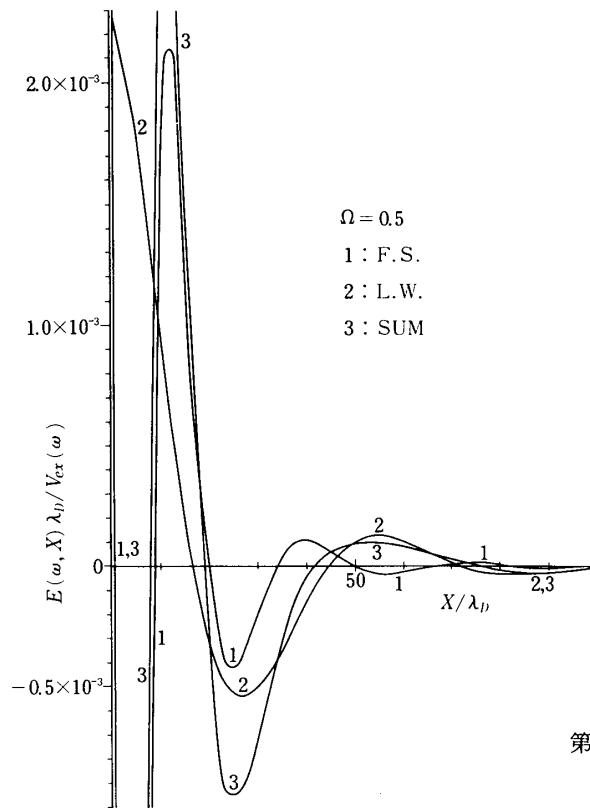
$$\begin{aligned} \frac{E(\omega, X)}{V_{ex}(\omega)} \lambda_D = & \delta(X) + \frac{2i}{\sqrt{2}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\sqrt{2} k_n \lambda_D)^3}{Z''(\Omega/\sqrt{2} k_n \lambda_D)} e^{i k_n \lambda_D X / \lambda_D} \\ & + \frac{2i}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2} \Omega} \left(i \cdot \frac{\Omega}{2\sqrt{2}} X / \lambda_D \right)^{1/3} \\ & \frac{\exp\left[-\frac{3}{2} \left(1 - i\sqrt{3}\right) \left(\frac{\Omega}{2\sqrt{2}} X / \lambda_D\right)^{2/3}\right]}{\left\{1 - \left(i \frac{1}{2\sqrt{2} \Omega^2} X / \lambda_D\right)^{2/3} Z' \left[\left(-i \frac{\Omega}{2\sqrt{2}} X / \lambda_D\right)^{1/3}\right]\right\}} \\ & \left\{1 - \left(i \frac{1}{2\sqrt{2} \Omega^2} X / \lambda_D\right)^{2/3} Z' \left[\left(i \frac{\Omega}{2\sqrt{2}} X / \lambda_D\right)^{1/3}\right]\right\} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで $\Omega = \omega / \omega_p$, λ_D : デバイ長, $V_{ex}(\omega)$: 励起電圧のフーリエ成分, Z : プラズマ分散関数 [9] である。また k_n は L.W. の分散式を満たす根である。 $n=1$ を基本波, $n \geq 2$ を高次モード [10] と呼ぶ。その分散式はブラソフ方程式から得られるプラズマ誘電関数を零として次式で示される。

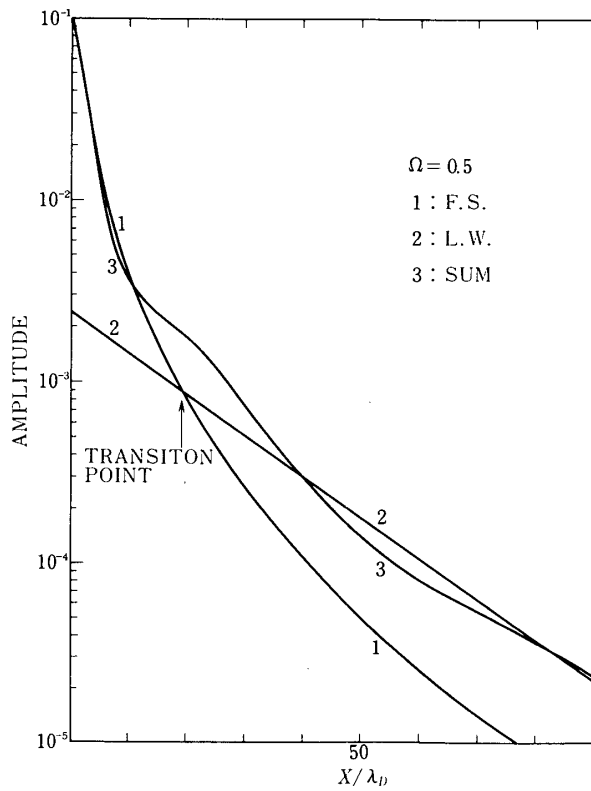
$$1 - \frac{1}{2} (k_D / k_n)^2 Z'(\Omega \cdot k_D / \sqrt{2} k_n) = 0 \quad (2)$$

ここで $k_D = 1/\lambda_D$ であり、根 k_n は表に整理されている [10]。(1)式右辺第一項は励起源を示し、第二項は L.W. の寄与を、第三項は鞍点法 [11] により近似した F.S. の寄与をそれぞれ示す。

$n=3$ に対する計算結果の一例 ($\Omega = 0.5$) を第1図に示す。同じ条件での振幅を第2図に示す。 $15 \leq X/\lambda_D \leq 35$ で F.S. と L.W. の位相が一致している。このため F.S. と L.W. の和 (観測値と対応するであろう) SUM の振幅が増し減衰率が著しく緩かになる。表1に励起効率と共に Transition point (T.P.) を記した。T.P. は F.S. と L.W. の振幅が等しい X/λ_D で定義した。表2に減衰率を記す。F.S. の A. 欄は見かけの減衰率を示し第2図の SUM へ接線を引いて求めた。T. 欄は真の減衰率を示し、後の(4)式から計算した。 $0.5 \leq \Omega \leq 1.0$ で A. 欄の方が T. 欄よりも X/λ_D が大きい程、減衰率が小さい。第3図には(1)式で $n=5$ まで取った場合の振幅を実線で示した。 $\Omega = 0.9$, $X/\lambda_D \approx 70$ に dip が見られる。 $n=3$ のみでは



第1図 電界の距離依存性. (1)式より計算した



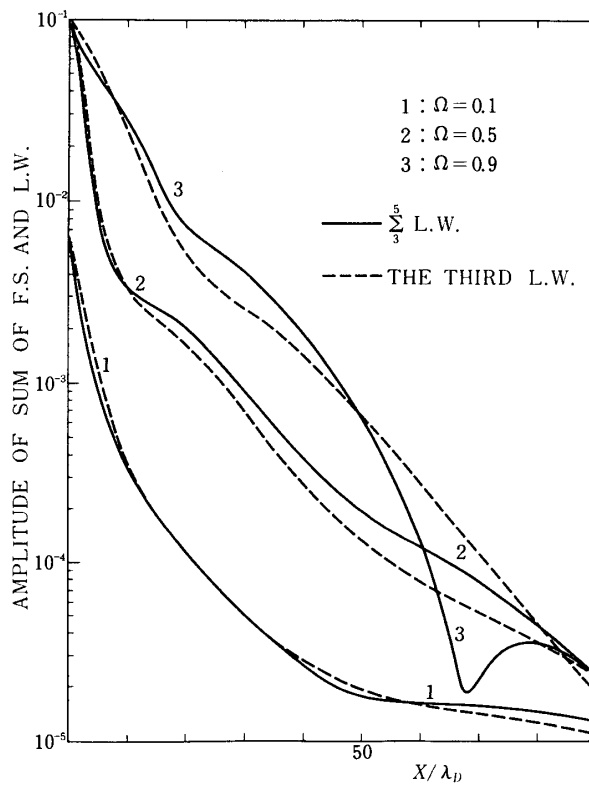
第2図 振幅の距離依存性. (1)式の絶対値

Table 1. Magnitude of Excitation Coefficient and Transitional Point

Ω	0.1	0.5	0.9
L. W.	0.153×10^{-4}	0.226×10^{-2}	0.253×10^{-1}
F. S.	0.449×10^{-2}	0.123×10^{-1}	0.106
T. P.	$100\lambda_D$	$20.0\lambda_D$	$7.5\lambda_D$

Table 2. Damping rate k_i/k_D (Neper)

Ω		0.1	0.5	0.9	
F. S.	T.	$X/\lambda_D=15$	0.0656	0.192	0.284
		$X/\lambda_D=25$	0.0546	0.162	0.239
		$X/\lambda_D=35$	0.0494	0.144	0.213
	A.	$X/\lambda_D=15$	0.108	0.0645	0.167
		$X/\lambda_D=25$	0.080	0.087	0.0645
		$X/\lambda_D=35$	0.0556	0.085	0.057
L. W.		0.011	0.052	0.081	



第3図 振幅 (5次モードまで含む) の距離依存性

点線で示すように dip はない。dip は高次モード同志が干渉してできたものであり [8], $\Omega \lesssim 1.0$, $50 \lesssim X/\lambda_D \lesssim 100$ で現われる。

F.S. の分散式は(1)式第三項より,

$$\frac{\omega}{k_r} = \frac{2}{3\sqrt{3}} (2v_e)^{2/3} (\omega X)^{1/3} \quad (3)$$

$$k_i/k_r = 1/\sqrt{3} \quad (4)$$

ここで k_r, k_i は F.S. の波数の実数部と虚数部で v_e は電子の熱速度である。また F.S. の真の減衰率は(3)(4)式より,

$$k_i/k_D = 3\Omega^{2/3}/4(X/\lambda_D)^{1/3} \quad (5)$$

以下に出てくる F.S. の分散式は(3)式で表わされる曲線を実験と合わせた [12].

Beam mode の分散式は water-bag model を用いた非マックスウェリアンプラズマに対して得られた [5].

$$1 - \frac{1}{2} (k_D/k)^2 Z'(\Omega \cdot k_D/\sqrt{2}k) - \omega_{pc}^2/(\omega^2 - v_c^2 k^2) = 0 \quad (6)$$

ここで ω_{pc} は water-bag 電子のプラズマ周波数, v_c は電子の truncated 速度である。Beam mode が観測される場合は(6)式第三項が支配的で分散式は $\omega \simeq v_c k$ となる [5].

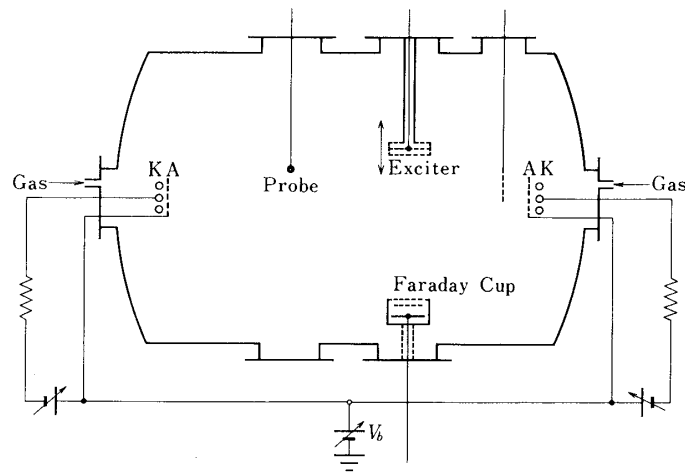
3. 伝播特性の観測

3.1. 実験装置

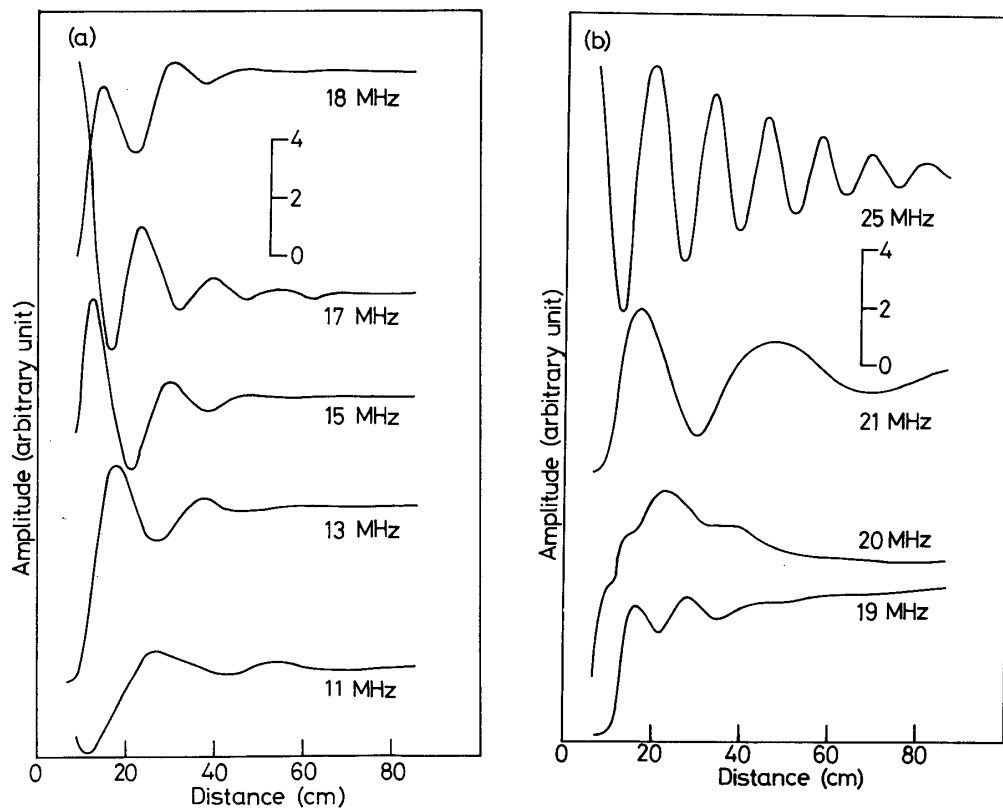
実験に用いたチェンバの概略を第4図に示す。チェンバは直径2m, 長さ3mで接地されている。ガスは A_r を用い左右2つのグローモードプラズマ源により一様プラズマを生成した。気圧は約 2×10^{-4} Torr, 電子温度 T_e と電子密度 N_e は5cmφの球プローブで測定し, $T_e = 3-5$ eV, $N_e = 4.5-12 \times 10^6/\text{cm}^3$ を得た。デバイ長 λ_D は約0.6cm。アノードに加えたバイアス電圧 V_b が0Vのときプラズマ電圧はほぼ接地電位と等しい。プラズマ電位は V_b を変化させアノード電位 V_a を変えることにより -30 V \sim 30 V 変化させることができる。波の励起は17cmφの3枚グリッドで行った。外側のグリッドは接地, 真中のに RF を加えた。受信は10cmφの金メッキされたファラディカップを用いグリッドは接地されている。励起グリッドに加えた高周波の周波数は1~50MHz ($\omega/\omega_p \simeq 0.1 \sim 2.0$) で振幅は0.3~10Vである。三枚グリッドをファラディカップ前面から0.5~80cm径方向に同期モータで送り干渉法により伝播特性を得た。ファラディカップで受信した信号を広帯域増幅器により増幅し送信器からの基準信号と共に Balanced mixer で検波し X-Y レコードで記録した。

3.2. Free-streaming の観測

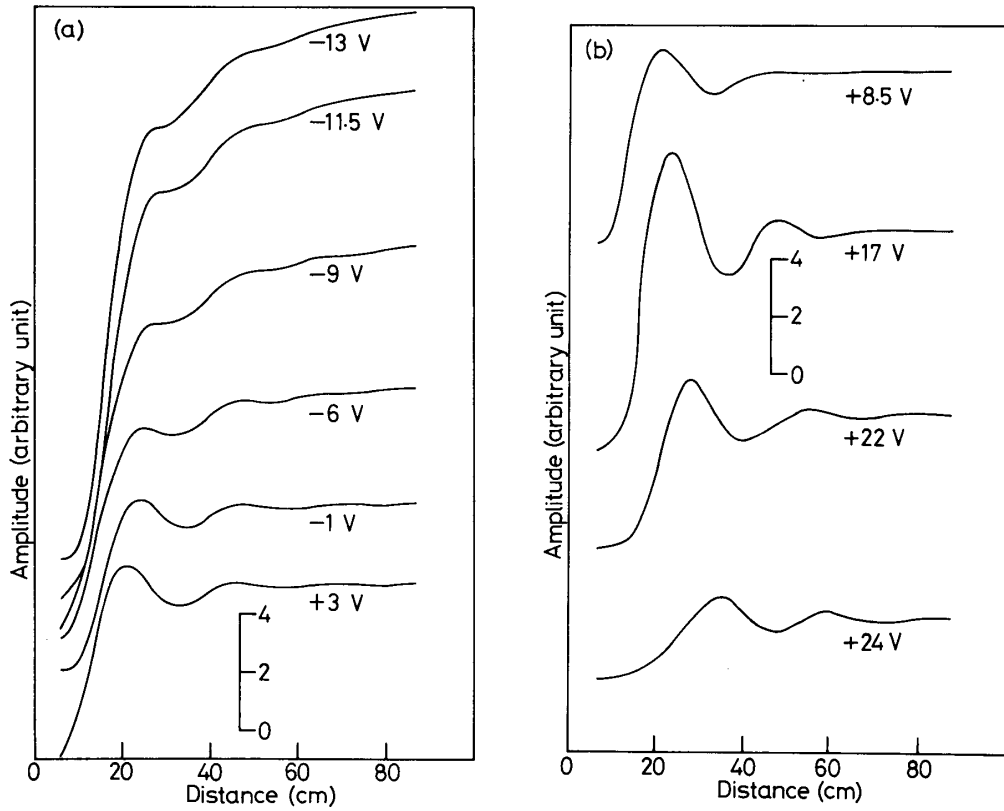
伝播特性の典型的な生のパターンを第5図に示した。この場合 $\omega_p = 20$ MHz, 励起グリッドは浮動電位にし励起高周波電圧は0.3Vである。パラメータは励起周波数である。第6図は $\omega/\omega_p = 0.68$ 一定の場合の伝播特性でパラメータはプラズマ電位である。これらの $\omega/\omega_p < 1$



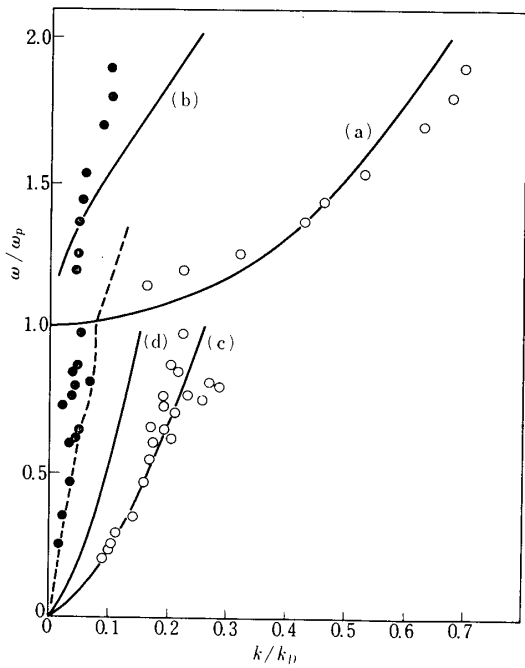
第4図 実験に用いたスペースチャンバの概略図



第5図 伝播パターン. パラメータは印加周波数



第6図 伝播パターン ($\omega / \omega_p = 0.68$). パラメータはプラズマ電位



第7図 分散関係. (a)(b)は基本波の実数部と虚数部. (c)(d)はF. S. の実数部と虚数部. 点線は2次モードの実数部

のパターンから波数 k を求め位相速度対 ω をプロットすると勾配 $1/3$ の直線に乗ること [4], 及び位相速度と減衰率とが励起高周波電圧 [14] とプラズマ電位によらないこと [15] から $\omega/\omega_p < 1$ の時励起される波は Free-streaming mode であることが判る. また分散関係を第7図に示す. 図中 $\omega/\omega_p > 1$ のモードは L.W. の基本波であることが伴る.

しかしながら第5図と第6図に示すように, F.S.の位相速度は距離依存性がない. また第7図から判るように減衰率 (k_i) が理論値より, 著しく小さいことから, 高次モードが励起されていることが Exciter から遠い所で顕著になることが期待される.

3.3. 高次の L.W. (高次モード) の観測

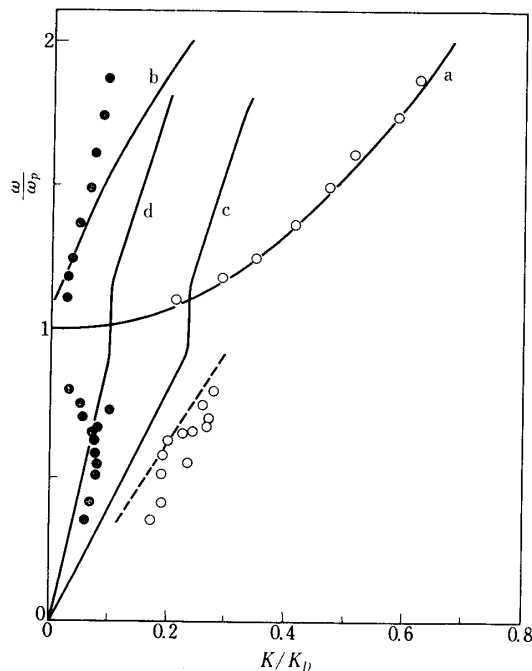
3.2 では $\omega/\omega_p < 1$ の受信パターンは Exciter に比較的近い所では F.S.であった. Exciter から遠い所で高次モードを観測するため, 次の点に注目する.

①Exciter から遠い所では, 近い所に比較して減衰率が F.S.のみと考えた場合より著しく小さい.

②位相速度 (同波数一定として波長) が距離依存性を示さない.

③振幅に $50 \lesssim X/\lambda_D \lesssim 100$ の間でへこみが現われるかどうか. 理論計算で $n = 3$ (3次の高次モード) と観測値を比較しよう. 理由は高次モードのうちで k_i はほぼ同程度であるが励起効率は3次の高次モードが最大であるからである [7]. 上記①②は3次の高次モード, ③は各高次モードの和について考える.

観測に際して良くボンバードされた球プローブ特性からプラズマ電子はマックスウェル分



第8図 分散関係. a, bは基本波の実数部と虚数部.

c, dは3次モードの実数部と虚数部.

点線はF.S.の影響を加えた場合の分散関係

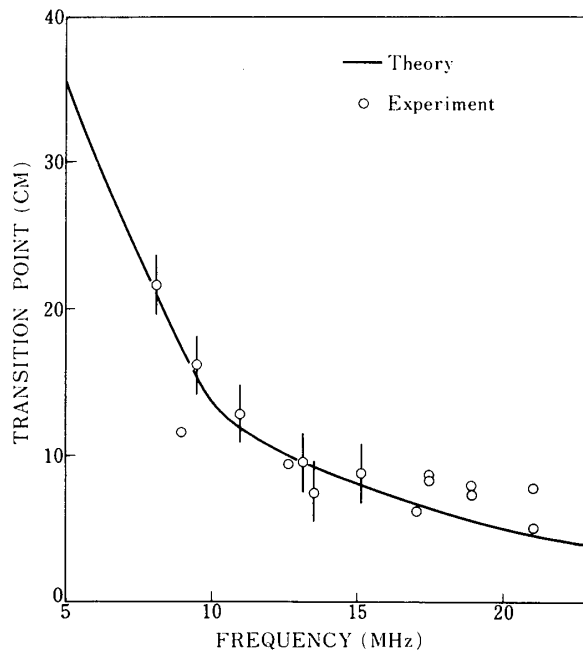
布をしていることが判っている。記録したパターンを分散関係に整理すると第8図になる。実線(c)(d)は3次の高次モードの分散式から得られ、それぞれ波数の実数部と虚数部を表わしている。この図から観測された分散関係は3次モードに対する理論曲線と定性的に一致を示している。第1図に示すようにF.S.とL.W.の位相の合った $15 \lesssim X/\lambda_D \lesssim 35$ の所ではF.S.の波数がL.W.の波数より多い。この効果を第8図の実数部に考慮すると破線で示したように、さらに良い一致を示す。又、虚数部についても、 $\omega/\omega_p=0.5$, $X/\lambda_D \simeq 35$ の時の減衰率の観測値 $k_i/k_D \simeq 0.08$ に対し [4], 3次モードの理論値は0.052であるが(表2), F.S.の影響も考慮した値は表2 A欄より0.085となる。この様に3次モードにF.S.の影響を加味すると観測値と理論値が非常に良く一致する。

また計算より周波数が ω_p に近づく時には3次モードでは励起効率と減衰率の増加がF.S.のそれらよりも大きいためT.P.はExciterに近づく。これを観測するため、パターンに包絡線を引き振幅を調べ減衰率が著しく緩やかになる距離を第9図に示す。実線は表1から得られた理論値である。図の○印は観測値である。理論値と実測値は一致している。次に高次モード特有のへこみを観測するため受信信号を80dB増幅した伝播波形から振幅をかいた一例を第10に示す。実線は計算で得られた理論値でありほぼ一致している。

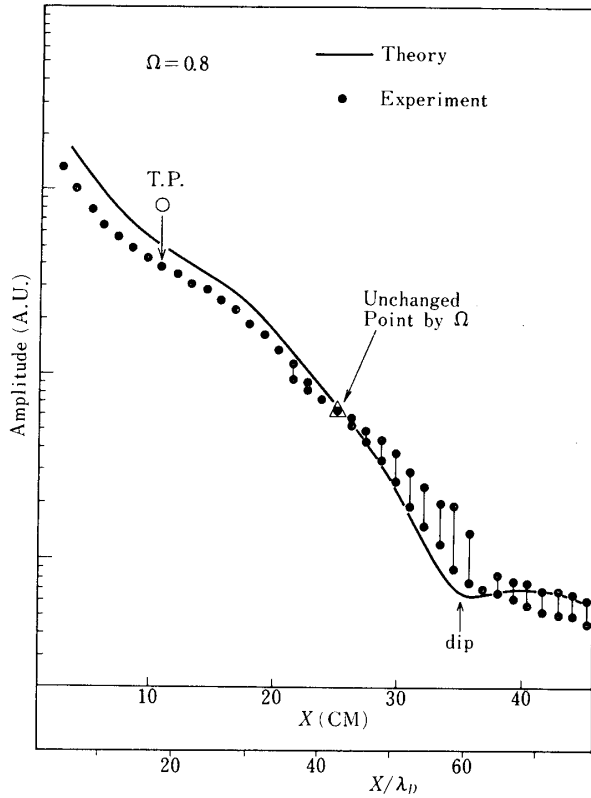
以上の結果からT.P.より遠くでは高次モードであることが判った。

3.4. Beam mode の観測

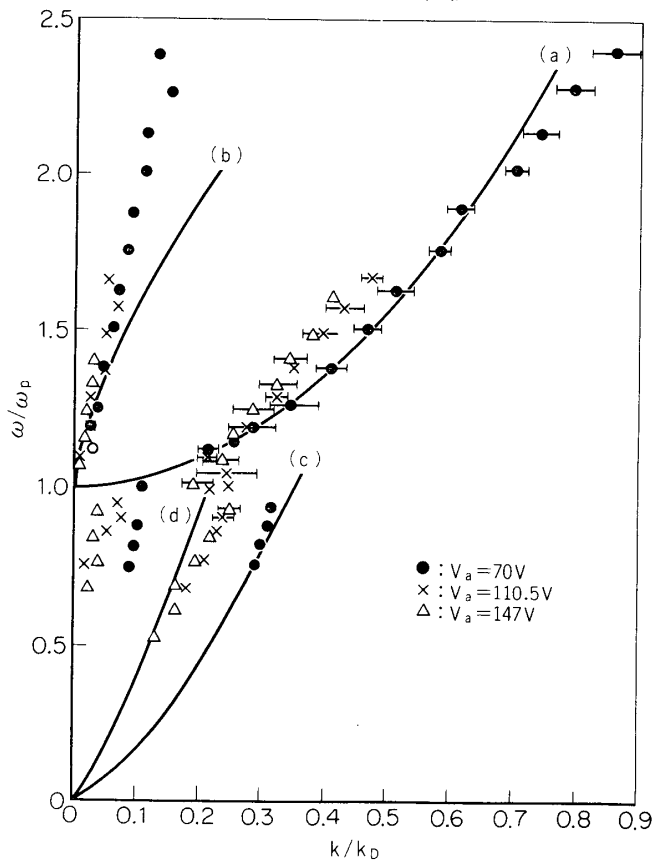
第4図が V_b によりアノード電位 V_a を上昇するとカソードから放出するエネルギーが一定で等方分布をした一次電子に起因するBeam modeが励起される。このときExciterを通過するビームの分布関数はwater-bag modelで示され、 $\omega/\omega_p < 1$ のとき分散式は $\omega/k \simeq v_c$ ($v_c \gg v_e$)一定となる [16]。その分散関係の観測値を第11図に示す。 $\omega/\omega_p < 1$ の場合位相速



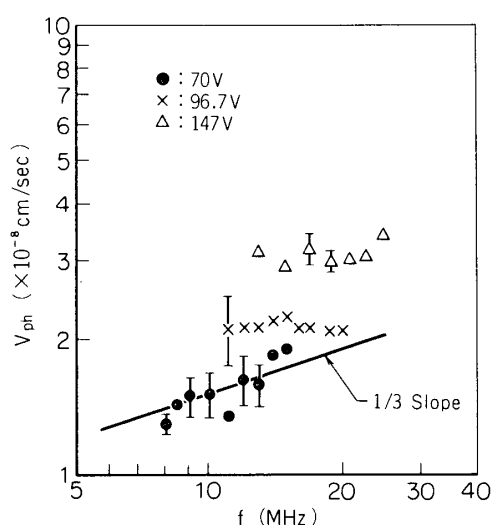
第9図 Transition point の周波数依存性



第10図 高次モードの検出. 実線は (1)式で $n = 5$ まで考慮した際の振幅. 理論計算で Ω によって変化しない Δ 印の所を実験と一致させた



第11図 Beam mode を検出した分散関係. (a)(b)(c)(d)は第7図と同じ



第12図 Beam mode を検出した位相速度 ($\omega/\omega_p < 1$)

度を測定し第12図に示す。 V_a が低い時は F.S. が励起されているが高くなると、Beam mode の励起効率が大きくなり、減衰率が著しく小さくなるので支配的となる [17]。位相速度 v_{ph} は周波数に対して一定となり、 $v_{ph} \simeq 0.5v_c$ の関係が判った。

さらに Beam mode のモデル実験として burst wave の実験がなされた [18]。カソードをはさんだ二枚グリッドにより burst wave が励起され、第11図と同様な分散関係と $v_{ph} \simeq v_b$ (v_b : ビーム速度) の関係が得られた [5]。

4. あとがき

要約すると

$\omega/\omega_p > 1$ では

- ① Landau mode の基本波が伝播する。
- ② ビームがあると基本波は Beam mode の伝播に変形する。

$0.5 \lesssim \omega/\omega_p \lesssim 1$ では

- ① Free-streaming mode は $X/\lambda_D \lesssim 15$ で伝播する。
- ② $15 \lesssim X/\lambda_D \lesssim 35$ では Free-streaming mode と高次モードが混在する。
- ③ 高次モードは $X/\lambda_D \gtrsim 35$ で残存する。正確には T.P. より遠い所で伝播する。
- ④ Beam mode (burst wave を含む) は V_a を大きくするか、電子放出励起子で励起され①③に対し支配的である。

今後の問題として各々のモードの励起効率を調べることにより、さらにその物理的性質を究明する必要がある。

謝 辞

日頃、激励下さいました金原淳教授、大林辰蔵先生に感謝致します。またスペースチェン

バの運転並に実験の準備に協力下さいました土田静悟氏と細谷和美氏に感謝致します。

1975年9月30日 新設部 (科学)

参 考 文 献

- [1] 河辺隆也, 河合良信, 坂翁介, 中村良治 : 宇宙科学研究特集号 8 (1972) 186.
- [2] Y. Nakamura, M. Nakamura, T. Itoh: IEEE Transaction on Plasma Science, SP-1 (1973) 100; Y. Nakamura, T. Itoh: J. Plasma Phys. 11 (1974) 131.
- [3] H. Derfler, T.C. Simonen: Phys. Rev. Letters 17 (1966) 172.
- [4] Y. Kawai, Y. Nakamura, T. Itoh, T. Kawabe: Phys. Fluids 16 (1973) 1307.
- [5] Y. Kawai, Y. Nakamura, T. Itoh, T. Hara, T. Kawabe: J. Phys. Soc. Japan 38 (1975) 876.
- [6] H.H. Kuehl, G.E. Stewart, C. Yeh: Phys. Fluids 8 (1965) 723.
- [7] T.C. Simonen: SUIPR Report No.100, Stanford Univ. (1966).
- [8] 池沢俊治郎, 河合良信 : スペースプラズマ研究会 (1974).
- [9] B.D. Fried, S.D. Conte: The Plasma Dispersion Function (Academic Press 1961).
- [10] H. Derfler, T.C. Simonen: Phys. Fluids 12 (1969) 269.
- [11] P.M. Morse, H. Freshbach: Methods of Theroretical Physics, Part I (McGRAW-HILL BOOK COMPANY, INC. 1953) P.434.
- [12] Y. Kawai, K. Kondo, O. Saka, T. Kawabe: Phys. Letters 36A (1971) 149.
- [13] 河合良信, 中村良治, 伊藤正貴, 伊藤富造, 河辺隆也 : スペースプラズマ研究会 (1973).
- [14] H. Ikezi, P.J. Barret, R.B. White, A.Y. Wong: Phys. Fluids 14 (1971) 1997.
- [15] 河合良信, 中村良治, 伊藤富造, 河辺隆也 : スペースプラズマ研究会 (1972).
- [16] D. Henry, J.P. Treguier: J. Plasma Phys. 8 (1972) 311.
- [17] J.P. Treguier, D. Henry: private communication.
- [18] M. Ito, T. Itoh, T. Kawabe, Y. Kawai, Y. Nakamura, S. Miyatake: Phys. Letters 46A (1973) 293.
- [19] T. Kawabe, Y. Kawai, O. Saka, Y. Nakamura, J.M. Dawson: Phys. Rev. Letters 28 (1972) 889.
- [20] Y. Kawai, K. Kondo: J. Phys soc. Japan 30 (1971) 85.
Y. Nakamura, M. Ito: Phys. Rev. Letters 26 (1971) 350.