

K-9M-35号機による非線形プラズマ 波動相互作用の実験*

宮武 貞夫** 松本 紘** 木村 磐根**

Rocket Experiment on Nonlinear Wave-Wave Interaction in the Ionospheric Plasma by K-9M-35

By

Sadao MIYATAKE, Hiroshi MATSUMOTO and Iwane KIMURA

Abstract: A controlled experiment on the nonlinear wave-wave interaction in the ionospheric plasma was performed by the Japanese sounding rocket K-9M-35 in 1971. The object of the experiment is to investigate a feasibility of an artificial realization of the most fundamental three wave process between two electron plasma waves and one ion acoustic wave in the ideal plasma in the ionosphere. A high frequency electric field was applied between two grids exposed on the plasma in order to transmit the first electron plasma wave (or oscillation). Detection of the second electron plasma wave and the ion acoustic wave was made by a probe stretched between the grids. The frequency (or energy) relation of the three wave decay process is checked by phase sensitive detectors together with wide band reception of the ion acoustic wave. The check of the wave-numbers (or momentum) relation was not performed for want of the weight and space of the equipment. The experiment was accomplished completely throughout the flight and we gathered much information about the dependence of the three wave decay process on the transmitting frequency, the local plasma parameters and on the DC-bias imposed on the receiving probe. The results are: (a) An excitation of the ion acoustic wave by the above three wave process is observed at a limited height in the ionosphere. (b) The process is closely related with not only the local plasma frequency but also the DC-bias of the probe. (c) A frequency spectrum of the ion acoustic wave depends on the local plasma frequencies and shows complex forms like risers and inverted hooks.

A comparison of the experimental results with a theory of the three wave process by Nishikawa is also made.

1. はじめに

最近のプラズマ物理学の重要なテーマとしてプラズマ波動と粒子、波動と波動の非線形相互作用が理論的にも実験的にも取上げられ、数多くの仕事が行なわれている。

* 宇宙研特別事業費による論文

** 京都大学工学部

宇宙空間プラズマのダイナミクスにおいてもプラズマ波動の非線形結合によるプラズマの乱れ (Turbulence, Chaos) が重要な役割を果していることは多くの研究者の間に一致した見解が見られているが、それらの定量的実験はいまだほとんど着手されていない。電離層プラズマ中での非線形波動現象としては古くはルクセンブルグ効果などが知られており、最近では Alouette のトップサイドサウンダのスペクトル中から非線形三波相互作用の現象 (略して「三波プロセス」と呼ぶ) が Oya [1] によって発見され、周波数の関係および波数の関係が押えられた。

わが国のロケット実験においては、K-9M-29号機の電波専用機によって、インピーダンスプローブの高周波印加時に VLF 帯のノイズが励起されるという現象が偶然に観測され (PRW) [2]、その後のスペース・チェンバによるシミュレーション実験においても同様に高周波を送信アンテナに印加した場合に VLF 帯のノイズの励起が見られるという非線形現象が確認された [3], [4]。これらは電子プラズマ波領域の高周波をプラズマに印加することによって大振幅電子プラズマ波が立ち非線形三波プロセスを通して低周波イオン音波が励起されたものと考えられた。

K-9M-35号機では上記の非線形三波プロセスが電離層プラズマという理想のプラズマ実験室において実現されるかどうかを確認すると同時に非線形三波プロセスに関する種々の情報を高度変化つまりプラズマパラメータの変化に対して収集する目的で、できるだけ多くのテレメータチャンネルを使用させてもらい実験を行なった。

本ロケットは昭和46年1月23日20時20分に内え浦より発射され最高高度336kmに達し、第1回の非線形プラズマ波動相互作用実験としては一応成功裡に終了し、目的の非線形

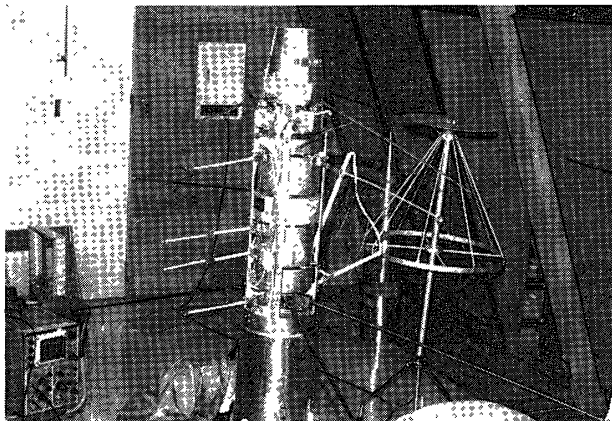


図1 K-9M-35号機搭載機器開頭およびアンテナ展開状態。非線形波動相互作用実験装置のセンサは左側にみられる「蠅たたき」のような2枚のメッシュとその間の受信プローブである。

三波プロセスの周波数関係と励起されたイオン音波領域の低周波のスペクトル、振幅などに関する情報が得られ電離層プラズマ中でのロケットによる非線形波動実験の有用性を確認し今後ともユニークなデータを提供できると考えている。さらに理論からは期待されなかった新しい現象も発見された。

第1図は本ロケットの開頭、アンテナ展開時の状態を示す。われわれの実験に使用したセンサ類は左側の二枚のメッシュ* とその中間にある二本の球プローブと、図には見えていないが、

ラングミュア球プローブとである。

* 実際は 5mmφ の円形の穴を数多くくり抜いたベリリウムカップの板である。

2. 理論的背景

プラズマ中の波動と波動の相互作用に関する理論的な仕事はこれまで多くの研究者の注目を集めてきた。プラズマに高周波電界をかけた場合の現象も、いわゆるパラメトリック励起の問題としていくつかの仕事が成されている。これらの仕事により印加する高周波の周波数が電子プラズマ周波数の近傍であれば、電子プラズマ波とイオン音波の間の相互作用を引起し電界の強さがある値以上になると電子プラズマ波とイオン音波の励起を引起することが知られているが、この電界のしきい値は、完全電離プラズマについてほぼ

$$\frac{\varepsilon_0 E_0^2}{n\kappa T_e} > \frac{\gamma_{pe}}{\omega_{pe}} \quad (1)$$

で与えられることが Goldman [5], [6] により示されている。ここに E_0 は印加する高周波電界の大きさ、 κ, ε_0 はそれぞれボルツマン定数および誘電率、 n, T_e はプラズマ密度と温度、 ω_{pe}, γ_{pe} はそれぞれ電子プラズマ周波数とその減衰率である。ちなみにこの不等式に代表的な電離層パラメータ、 $n=10^6/\text{cc}$, $T_e=1.5 \times 10^3 \text{K}$, $\gamma_{pe}/\omega_{pe}=0.5 \times 10^{-4}$ を代入するとしきい値はほぼ $E_0 \sim 0.1 \text{V/m}$ となる。この程度の振幅は実際に電離層中で人工的に十分発生しうる値と考えられるが、より定量的な議論を進めていく場合、非線形現象特有の計算の煩雑さがそのさまたげとなってくる。これらの煩雑さは問題を現象論的に取り扱うことにより理論的な厳密さがそこなわれることになるにしろ、大幅に緩和される。プラズマ中に高周波電界を印加した場合の電子プラズマ波とイオン音波の励起に関して Nishikawa [7] は流体近似と静電近似を用いて現象論的に次のような分散式を示している。

$$(1 + \sum_{s=i,e} \alpha_s(\omega)) - \alpha_e(\omega)A(\omega)(1 + \alpha_i(\omega)) = 0 \quad (2)$$

ここに

$$\alpha_s(\omega) = \frac{\omega_{pe}}{\omega^2 + j\nu_s\omega - k^2\omega_{pe}\kappa T_s/m_s} \quad (3)$$

$$A(\omega) = \left(\frac{\varepsilon_0 \kappa E_0}{ne} \right)^2 \left(\frac{\alpha_e(\omega - \omega_0)}{1 + \alpha_e(\omega - \omega_0)} + \frac{\alpha_e(\omega + \omega_0)}{1 + \alpha_e(\omega + \omega_0)} \right) \quad (4)$$

上式において $s=(i, e)$, ω, k は励起される波の角周波数および波数、 ω_{ps}, ν_s, T_s はそれぞれプラズマ周波数、衝突周波数および温度、 $m_s, \kappa, \varepsilon_0$ および e はそれぞれ粒子の質量、ボルツマン定数、誘電率および電子の電荷である。 n はプラズマの密度、 E_0 は印加する高周波の強さを表わす。

この分散式はプラズマに高周波電界を印加する代わりにその役割を電子プラズマ波になわせても有効であるが、プラズマ波が分散関係を満足することおよびその振幅が大きいときにはそれ自身非線形波動の問題として取り扱わなければならないことに注意しなければならない。

分散式の解として、イオン音波の領域に属する振動形の解と非振動形の存在しどちらが低い電界で成長するかは衝突周波数とイオン音波の周波数とのかね合によることが Nishikawa により示されている。実際に電離層プラズマのパラメータに近い数値を与えて数値計算した例を図 2 (a), (b) に示す。この例では印加高周波電界の周波数および強さはそれぞれ 10

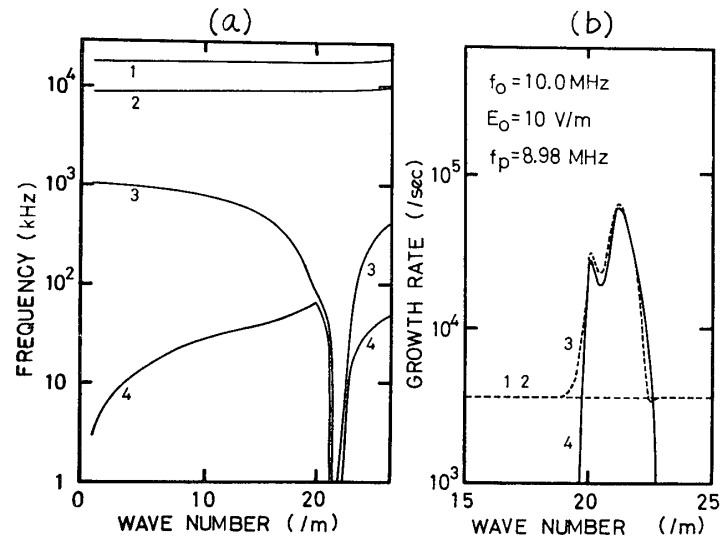


図2 分散(2)式の数値計算例. (a) ω_r-R ダイアグラム, (b) ω_i-R ダイアグラム

MHz, 10 V/m, 中性粒子および密度およびプラズマ密度は $10^{12}/\text{cc}$ と $10^6/\text{cc}$, 電子, イオン温度はそれぞれ 3000°K , 300°K とした. (2) 式で与えられる分散式は複素係数の8次代数方程式で有意な種の解が得られる*. これらの解 ω に対応して $\omega_0 \pm \omega$ も分散式を満足する. ただし ω_0 は印加高周波電界の周波数である. 図2(a), (b) は(2)式で与えられる分散式に実数を与えて得られた解の実部, 虚部を $\omega-k$ ダイアグラムとしたもので図中の1~4はそれぞれ四つのモードの対応を示す. 図2(b)で実線は正, 破線は負を表わす. ここで注目すべき点は図2(a)のモード4は波数(ここでは波長の逆数を意味する)20~25かなり変形を受けるがイオン音波での分散に相当し, このイオン音波が波数20および22近傍でそれぞれ成長率のピークをもつことで, これ以外のモードで正の成長率を持つものはない. 上述の二つの成長率のピークは対応する周波数がイオン音波の領域に属する振動形不安定性と周波数が零の非振動形不安定性に相当する. 得られた成長率は 10^5 sec^{-1} に近くきわめて大きな値を示す. これは計算例での高周波電界のエネルギーがプラズマの熱エネルギーの約 3×10^{-2} に相当する大きな値にとられたため, 他の計算ではエネルギーの比が 3×10^{-6} 程度 ($E_0 \sim 0.1 \text{ V/m}$) でもイオン音波の成長が見られる.

3. 実験装置

3.1 実験の原理

すでに述べたように目的とするものは, 電子プラズマ波の三波プロセスによる decay を通してイオン音波が励起されるかどうかを確認することである. このことを実験的に検証するには励起する波の周波数, 波数ベクトルを (ω_0, \mathbf{k}_0) , 励起される第二の電子プラズマ波およびイオン音波のそれを $(\omega_h, \mathbf{k}_h), (\omega_l, \mathbf{K}_l)$ とすると

$$\omega_0 = \omega_h + \omega_l \quad (5)$$

* あとの四つは位相速度の逆向きのものである.

$$\mathbf{k}_0 = \mathbf{k}_h + \mathbf{k}_l \quad (6)$$

の二つの Resonance 条件, つまりエネルギー保存およびモーメント保存が確認されなければならない. ω の関係および \mathbf{k} の関係の両者を押えた満足すべき実験はわれわれの知る範囲ではいまだ地上プラズマ実験においては実現されていない [8]. われわれはすでに K-9M-29 号機において, 高周波によって非線形プロセスを通して低周波 (VLF 帯) 波動の励起が見られることを知っているのがこれが理論で予測される三波プロセスであることを確認するために, まず第一段階として (5) 式の関係の有無を調べることにした.

プラズマに印加する高周波の周波数として, 予測される最高プラズマ周波数 f_{pe} をはさんで 2.0 MHz, 4.5 MHz, 9.8 MHz を選定した. これは高度によって f_{pe} が変化するため高度によってどの印加周波数で非線形プロセスが実現されるかを調べるためである.

(5) 式で示す関係式を満足しているかどうかを調べるためにわれわれは PSD (Phase Sensitive Detector) 方式を採用した. まず上述の周波数の高周波をプラズマを狭む二枚の平行穿孔板*(120 mm×150 mm, 穴 5 mm ϕ) に印加し, その間に置かれた二本の球プローブおよび二本の棒プローブによってそれぞれ低周波信号および高周波信号のみを取り出す. ここで得た高周波信号 ω_h と印加高周波 ω_0 のビートを取り差成分 $\omega_0 - \omega_h$ を取り出し, 低周波信号 ω_l とともに PSD の入力とする. A_0 を印加高周波の振幅, A_h, A_l および θ_h, θ_l を高周波信号と低周波信号の振幅および位相とすると PSD の出力 V_0 は

$$V_0 = \frac{1}{2} A_0 A_h A_l \cos \{(\omega_0 - \omega_h - \omega_l)t - (\theta_h + \theta_l)\} \quad (7)$$

で与えられ $\theta_h + \theta_l = \frac{\pi}{2}$ でない限り (5) 式の関係为满足するような三つのプラズマ波 $\omega_0, \omega_h, \omega_l$ が存在すれば PSD に出力が得られる. $\theta_h + \theta_l = \frac{\pi}{2}$ のときには, (5) 式と満足する場合にも出力が得られないのでこれをさけるためにもう一系統の PSD を設けてその入力信号の位相差を $\frac{\pi}{2}$ ずらしている. したがってなんらかの非線形プロセスで低周波側に出力が得られても PSD 出力と同期しないものは非線形三波プロセスによるものではないことがいえる. これが測定の原理である.

このほかに高周波および低周波信号の振幅, 低周波信号の広帯域スペクトル (0.3~30kHz) メッシュへの印加高周波電圧を情報として地上に送る**.

今回の装置には, 受信感度を上げる目的と直流バイアスの影響を見るために低周波用球プローブに 0~10 V の直流電圧をある特定の試験周期に掃引印加している. これがあとに述べるように非常に興味ある現象を引き起こしている. これらの装置とは別に電子密度および電子温度の情報源としてラングミュアプローブを併載している.

3.2 ブロック図とタイミング図

本ロケットに搭載された実験装置のブロックダイアグラムを図 3 に示す. テレメータとしては IRIG テレメータのほかに広帯域テレメータを 1 台追加し, 低周波信号のスペクトルを

* 以下「メッシュ」と呼ぶ.

** 低周波受信機の感度は入力電圧で 10 μ V(S/N 10 db), 高周波受信機の感度は同じく入力電圧で 10 mV(S/N 10 db) であった.

K-9M-35 PWI BLOCK DIAGRAM

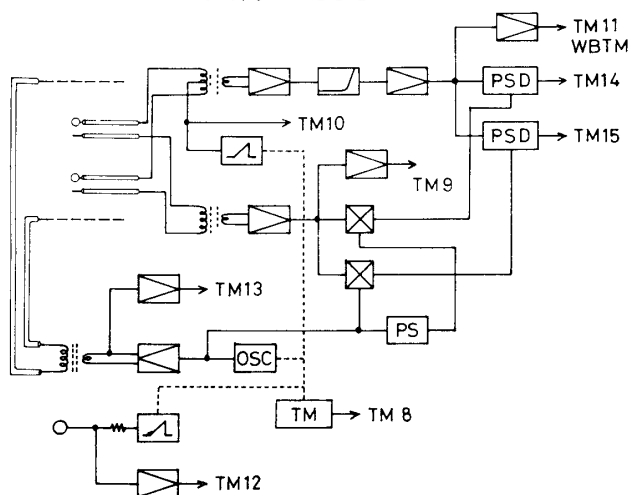


図3 K-9M-35号機搭載の非線形プラズマ波相互作用実験装置のブロック図

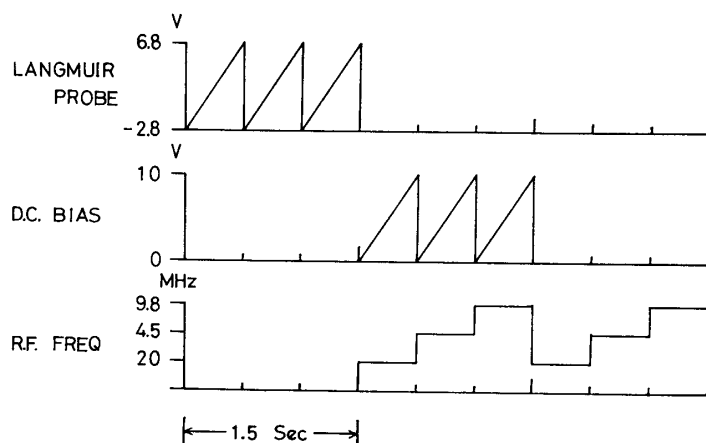


図4 K-9M-35号機搭載の非線形プラズマ波相互作用実験装置のタイムチャート

伝送している。

実験のタイミングは次のように考慮されている。第4に掲げるタイミングチャートに見られるように周期は約4.5秒でそれを三つの期間の1.5秒ずつに分けている。第1期間では低周波受信機で低周波信号を受けて自然ノイズを観測するとともに、ラングミュアプローブにより電子密度および電子温度の測定を行なう。第2期間では低周波受信プローブに直流バイアスを掃引印加しつつ、0.5秒ずつ、順次2.0 MHz, 4.5 MHz, 9.8 MHzの高周波をメッシュに印加する。第3期間では直流バイアスを止めて高周波の印加を同様に行なう。このようなタイミングに従い高周波印加時の非線形プロセスによる低周波の信号と自然ノイズの区別を行なうと同時にプローブに加える直流バイアスの影響を見ることができる。

4. 実験結果

スペースプラズマ中での三波プロセスによるプラズマ波とイオン音波の励起の確認を目的として、前章に述べた実験装置は K-9M-35 号機に搭載され全飛しょうを通して正常に動作した。

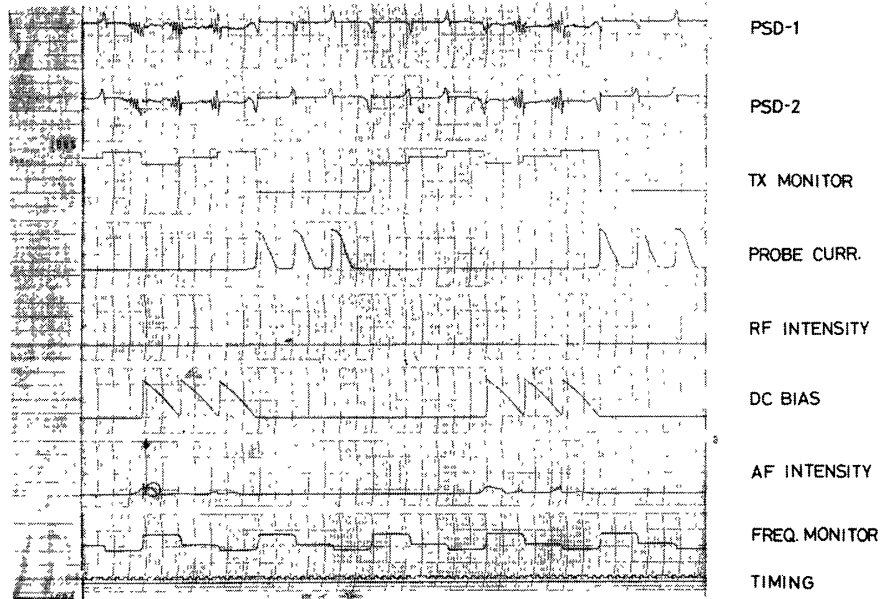


図 5 テレメータにより伝送された生データ(8チャンネル分) このほかには広帯域テレメータによる 0.3~30 KHz のデータがある

この装置からテレメータを通して送られたデータを図5に示す。図中 PSD-1, PSD-2 は 2 系統の Phase Sensitive Detector の出力, TX MONITOR は印加高周波の強度, PROBE CURR はラングミュアプローブのプローブ電流, RF INTENSITY, AF INTENSITY は 2 組の受信プローブで受信された高周波および低周波信号の強度, DC BIAS は低周波信号用プローブに印加される直流バイアスの大きさ, FREQ MONITOR は印加高周波の周波数とそれぞれ知るためのものである。IRIG 方式テレメータによるこの 8 種のデータのほかに Wide Band テレメータにより低周波信号の周波数スペクトル (0.3~30 KHz) も地上に伝送された。

4.1 三波プロセスの確認

三波プロセスによるイオン音波およびプラズマ波の励起を確認するためには前章で述べたように印加する波と励起される波の間に(5), (6)式で示される周波数関係および波数ベクトル関係を知ればよい。今回の実験では装置の関係から周波数関係およびその強度, 周波数スペクトラムに関する情報を総合することにより三波プロセスの確認の第一歩とした*。

図6に打上げ後 172 秒, 293 秒, 302 秒の PSD の出力および低周波信号の強度の相関を示す。PSD の出力 (PSD) は受信プローブに印加する直流バイアスが 0V に落ちる瞬間からほ

* これは波数測定装置をロケット搭載に適した形にできなかったことによる

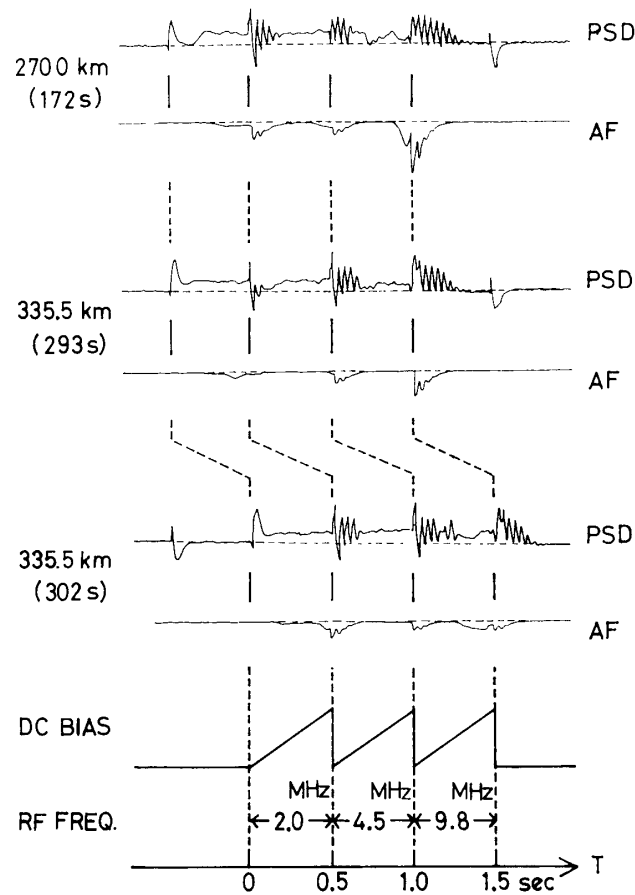


図6 代表的な高度における PSD 出力と AF 振幅データとの比較

ば周波数の一定な 30 Hz の減衰振動*を示し、その後低周波信号のレベル (AF) の変化に対応した変化を示す。この場合 PSD の出力は前節(7)式で示したとおり、二つの信号の強度とその位相差に関係していて、低周波信号の増加により必ずしも増加しないが低周波信号レベルの変化に対応した PSD 出力の変化を識別することは可能である。図6において、高度 270.0 km (172 s) の場合、2.0 MHz の高周波印加後ほぼ 0.25 秒後に AF, PSD とも出力の増加が認められる。4.5 MHz の印加後 0.3 秒後に AF の出力の増加が見られ、それに対応する PSD の出力の増加が見られる。9.8 MHz の場合には AF 出力は 0.4 秒後に急激な増加を示すが PSD の出力はそれに対応して出力の減少を示す。次に図7にこれらのデータに対応した低周波の信号のスペクトルのグラフを示す。図6に見られた AF, PSD の変化は図7に現われているエミッションの周波数スペクトルと1対1の対応を見ることができる。すなわち高度 270.0 km において 2.0 MHz 印加後約 0.25 秒後から 2.0 MHz の高周波印加が終わるまでの間、ソナグラフのほぼ全周波数バンド (0~8 kHz) にわたりエミッションが見られる。4.5 MHz の場合には、0.3 秒後からシャープなスペクトルを持ったエミッシ

* これについては次節に述べる。

ンが inverted hook に似た周波数変化を示している. 9.8 MHz の場合には 0.4 秒後から 4 kHz を中心にひろがった周波数スペクトルを持つエミッションが現われている. 高度, 335.5 km (打上げ後 293 秒), 同じく高度 335.5 km (打上げ後 302 秒) の場合にも同様な PSD, AF およびソナグラフの相関を見ることができ. すなわち, 335.5 km (293s) において 2.0 MHz 印加時にはシャープなスペクトルをもつエミッションとそれに先行するほぼ全周波数範囲にわたるエミッションがソナグラフ上見られる. また, 同高度の下り 335.5 km (302s) には, 2.0 MHz と 9.8 MHz 印加時にそれぞれシャープなスペクトルを持ち周波数変化の著しいエミッションをみることができ, 図 6 とのよい一致がみられる.

図 5 で示したように, 高周波信号のレベルを測定する RF INTENSITY の出力は, 高周波電圧印加時にもまったくふれていないが, これは PSD の動作を安定にするために, 高周波信号受信回路の入力インピーダンスを下げたため, プロブの容量を 1 pF としても, 2 MHz で 8 V/m, 9.8 MHz で 16 V/m 以下の信号にはレスポンスを示さない. したがって電子音波の存在をこのテレメータ出力によって確認することはできないが, 感度の非常に高い PSD によって, その存在は検出されている.

この励起されるエミッションは, 印加高周波の周波数によって, 振幅, 励起までの時間などがロケットの飛しょう時間, すなわち高度とともに変化する. 図 8 はこれらの変化のうち, 飛しょう時間と励起された低周波エミッションの振幅の関係を, 印加高周波の周波数別に示したものである. ただしこの図中では, 励起されるエミッションのスペクトル, たとえば上述のシャープなスペクトルをもつエミッションと, 周波数帯域の広いスペクトルをもったエミッションについての分類はしていない. このようにロケット高度を変化させた場合, 低周波エミッションの出る高度および振幅が印加高周波数 (2.0, 4.5, 9.8 MHz) によって, それぞれ違ったパターンを示している. この結果に対する検討はあとの考察で行なうことにする.

4.2 低周波減衰振動

前節で述べたように, 低周波受信プロブに加える直流バイアスの立ち下りによって, 約

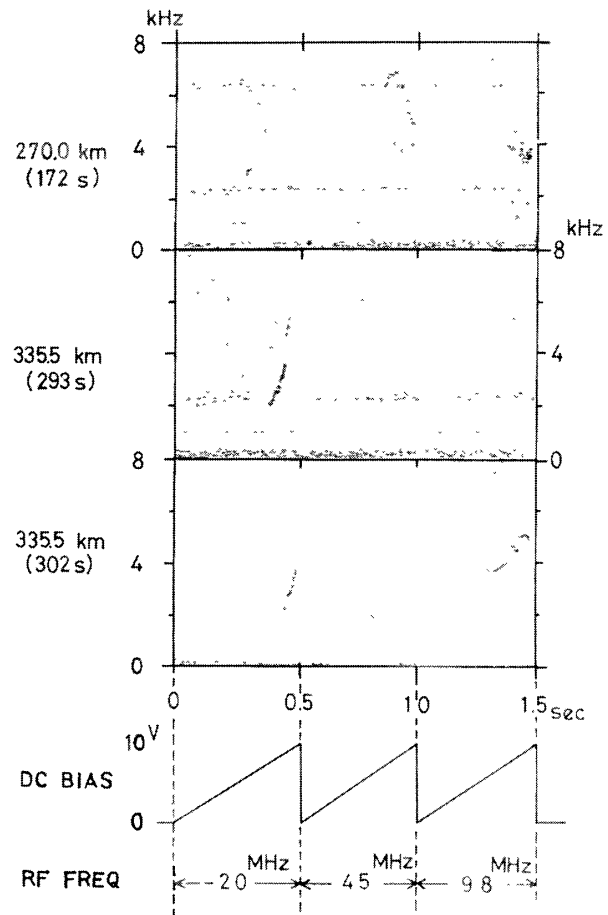


図 7 図 6 に対応する高度における低周波エミッションの周波数スペクトル

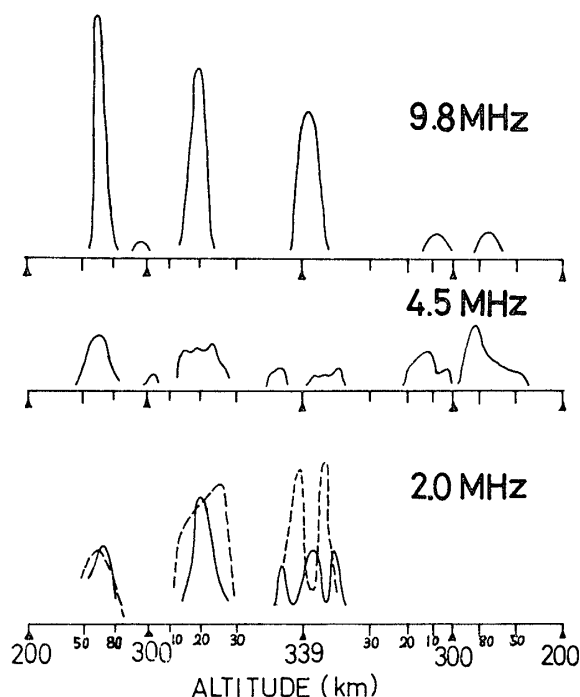


図 8 励起された低周波エミッションの振幅対高度特性印加高周波の周波数によって励起される場所が微妙に変化している。

ローブの静電容量の差および電子とイオンの移動度の差により、ロケット本体が通常の電位よりも負にバイアスされる。この負にバイアスされたロケット本体からプローブをつきだして、プローブがスペース電位より高くなるように正の電位を与えるとプローブにはイオン電流はほとんど流れこまず、電子のみがプローブを通してロケット本体に流れ込む。ロケット本体はさらに負にバイアスされる。このとき急にこの正電位を 0 にするとプローブはロケット本体と同電位になり、スペース電位より負になって急にイオン電流を取り込むが、このときプローブの負電位に加速されたイオンがプローブのまわりにあつまると逆にプローブのまわりのイオンシースは全体としてスペース電位に対して正となり、イオンの加速を抑えることになる。ロケット本体は、ちょうど大きなコンデンサと同じと考えられて、イオンシースの変動によるインダクタンスとロケット本体のコンデンサで構成される共振回路の振動数がこの現象を支配していると考えられる。ただしロケットの容量は高々 10^{-9} F であるからシースが負うべきインダクタンスは 4×10^4 H となる。今回はメッシュの midpoint をロケット本体にアースし、約 $25V_{pp}$ の高周波を印加していたため、上述のプロセスが引き起こされたと思われよう。

4.3 直流バイアスの役割

前節で高周波電界を印加したとき、PSD, AF およびソナグラフにそれぞれ対応のつくエミッションの発生することを述べたが、これらの現象は、同じ高周波電界を印加したときでも直流バイアスを受信プローブに加ええない場合にはほとんど見られない。また、上述のエミッションの多くが、直流バイアス 5V 以上になってはじめて検出されるということが見出

30 Hz の減衰振動が PSD に現われることが発見された。(図 5, 図 6 参照)。この振動の周波数は、ほぼ全飛しょう時間にわたって一定で、電子密度などのプラズマパラメータの依存性もほとんど認められない。印加高周波との間にも有意な依存性はない。ただしこの振動はロケットが電離層に入り、電子密度がある程度以上に達してから現われることからプラズマとは無関係の装置に起因する現象ではないことは確かである。またこの振動の減衰率は、一定ではなく、まったく振動自体が現われない場合もあるが、プラズマのパラメータとの相関はいまのところ発見できない。

原因と考えられるのはプラズマ中でスペース電位とフローティング電位の差より大きな振幅をもつ高周波を、ロケット本体とプローブの間にかけるとロケット本体とプ

される。したがって、この直流バイアスは、この低周波のエミッションの発生ときわめて密接な関係をもっていて、上述のエミッションと直流バイアスの関係を説明するには、直流バイアスそのものが、たとえばイオンを加速するといったプラズマへの影響を及ぼしているのか、単にプラズマ中のプローブの感度を高くしている [9] 結果によるかのいずれかであると思われる。前者の考え方と密接に関係ある現象は、スペース・チェンバ内における波動の基礎実験中に発見され、報告されている [3]。これはラングミュアプローブに直流バイアスを掃引印加した場合、イオン音波の周波数がそれによって変調をうけるという事実である。

しかし、いずれにしても直流バイアスがこのような非線形プロセスにどのような形で関与しているのかは興味ある問題で今後くわしく検討していく必要がある。

5. 考 察

前章で三波プロセスによると考えられる低周波のエミッションの検出されたことを述べたが、ここで大きな問題となるのはこれらのエミッションが実際に波動といえるかいかである。したがって波動としての確証を得るために、ロケット搭載装置に波数測定装置を搭載する方法を考慮するか、あるいは親子ロケットといった形で実験を行なうかの方法が次の実験では必要となろうが、これらの準備として理論的検討と実験室プラズマでの実験がこれらの問題を解決するには有効な手段であろう。

図 8 で観測されたエミッションの励起と高度の関係を示したが、これらと電子密度、電子温度、衝突周波数などのプラズマパラメータとの対比が残された問題を解く重要な鍵である。幸なことに K-8 M 35 号機には電子密度測定のためにドップラ受信機、インピーダンスプローブ、さらにわれわれのラングミュアプローブが搭載されていて、精密な電子密度の測千が期待されたが誤差の補正などの問題が各測定には残されているものの測定値の間にはかなりのバラツキが見られる。電子密度と三波プロセスによる励起の相関についての正確な議論には、これらの測定値間の差が大きな問題となる。ここで図 8 に示した 9.8 MHz の高周波電界印加時に励起されるエミッションに注目すると、高度 250 km 以上（打上げ後 160 秒から 430 秒に相当する）に五つの励起領域が見出される。これらの五つの領域での電子密度がほぼ等しいと見なすと高度 250 km 以上の電子密度の変化は図 9 に示すようになる。図 9 はドップラ法により測千された電子密度プロファイルをもとにして書かれたもので、図中黒丸および白丸で示された点はドップラ法により測定された電子密度で、1~5 までの数で示した領域は 9.8 MHz の高周波電界によりエミッションが励起された区間を意味する。飛しょう時間 400 秒前後に 4, 5 の二つの励起領域があるが、この領域 4 および 5 の少しまえに 4.5 MHz の高周波すなわち 9.0 MHz の高周波電界によると考えられるエミッションが励起されていることから考えると、この近傍の電子密度プロファイルはドップラ法による測定値とは異なって破線で示すようなものと考え方が妥当と思われる。これはインピーダンスプローブにより測定されたプロファイルとよい一致を示している。

図 8 に示すように、4.5 MHz, 2.0 MHz 印加時にもエミッションの励起が見られるが、これらはプラズマ周波数が 4.5 MHz あるいは 2.0 MHz よりも少し低い所では見られず高度

* 江尻. パーソナル・コミュニケーション

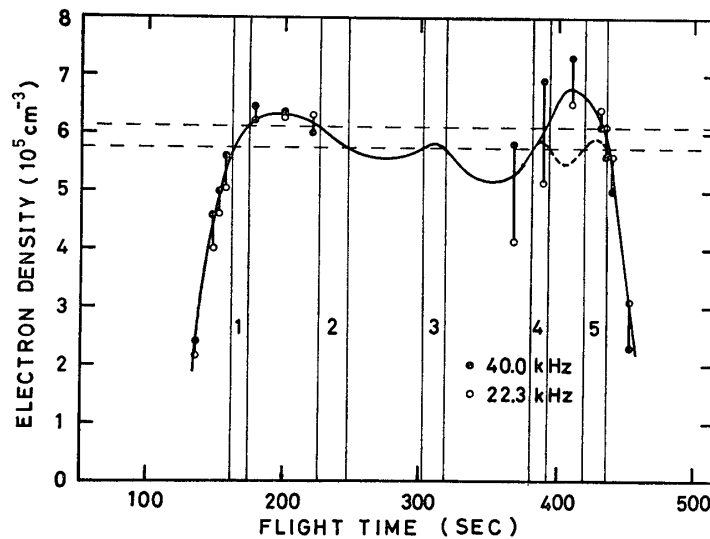


図9 ドップラ実験と 9.8 MHz 印加時の低周波エミッションの励起高度から得た模式的電子密度プロファイル

がさらに高くプラズマ周波数が印加周波数よりも高いところでエミッションが励起されている。これはプラズマ周波数が 2.0 MHz あるいは 4.5 MHz の近傍に等しい高度ではロケットの上昇速度が大きく現象が観測できなかったか、あるいは不安定性の成長に必要な時間が不足したと考えられる。プラズマ周波数が印加周波数より高い場所での励起は、印加高周波のひずみが原因で高調波に相当する電子プラズマ波が励起された低周波のエミッションを励起したと考えられる。

ロケットによる三波プロセスの実験としては一応の成果が得られたが、明らかになった問題点たとえば波数ベクトルの測定の必要性、あるいはプローブに印加する直流バイアスの役割などについての地上での実験および理論的考察が今後の仕事として残されている。今回の実験では測定できなかったが三波プロセスの重要なパラメータである高周波電界強度の算出が理論との対比で重要な役割を果たしており、非線形現象を議論するうえで一つの問題点となる。今後のロケットによる実験では前述のごとく今回の方式から一歩進めて、相関計などの波数測定器を搭載するかあるいは適当な分離速度の親子ロケットによる実験が有効であろう。

謝 辞

本ロケット実験を遂行するうえで多大の御努力と御協力をしていただいた大林辰蔵教授をはじめとする東大宇宙研ロケット実験班の方々に深く感謝いたします。

筆者らが平素御指導を賜わっている前田憲一教授および有意義なコメント並びに激励をいただいた大家 寛助教授に感謝の意を表します。またこの実験装置は明星電気(株)の製作によるもので福島、爪本、小川の諸氏に労を煩わしていただいた。ここに謝意を表します。また実験の協力およびデータ処理に御尽力してくださった本学松尾敏則郎技官および理論計算を手伝って頂いた本学学生山崎満則君に感謝します。

1972年2月5日

参 考 文 献

- [1] Oya, H., Experimental Verification of Theory of Weak Turbulence, NASA Rept. 71—621 (1971)
- [2] 松本紘, 橋本弘蔵, 木村磐根, K—9 M—29 親子ロケットによる VLF 帯電波伝播実験, 日本地球電磁気学会 47 回予稿 p 122 (1970)
- [3] Matsumoto, H., S. Miyatake and I. Kimura, Fundamental Experiments on Wave Phenomenon in Space Chamber Plasma, Rep. Ionos. Space Pes. Japan **25**, 40 (1971)
- [4] 松本紘, 宮武貞夫, 橋本弘蔵, 木村磐根, 伊藤富造, 山崎芳次, スペース・チェンバによる非線形波動相互作用実験, スペース・プラズマ研究会報告集. p.85 (1970)
- [5] Goldman, N. V., Parametric Plasmon-Photon Interaction Part I, Threshold for Amplification of Plasmons, Ann. Phys. 38, 95 (1966)
- [6] Goldman, N. V., Parametric Plasmon-Photon Interaction Part II, Analysis of Plasmon Propagator and Correlation Functions, Ann. Phys. 38, 117 (1966)
- [7] Nishikawa, K., Parametric Excitation of Coupled Waves I, and II, J. Phys. Soc. Japan **24**, 916 and 1152 (1968)
- [8] Cano, R., C. Etievant, I. Fidone, J. Olivain, M. Mattioli and M. Perulli, Nonlinear Process in a Magnetized Plasma, Phys. Fluids **10**, 2260 (1967)
- [9] 岩井 章, 早川正士, Plasma-Induced Radio Frequency Interferences from Spacecraft, スペース・プラズマ研究会報告集, p 21 (1969)
- [10] 木村磐根, 平石謙治, 富本哲雄, VLF ドップラ法による電離層中の VLF 電波の波面法線方向の測定, 電子通信学会アンテナ・伝播研究会資料 A, p 71-41 (1971—11)