

# K-9M-41号機による非線形波動-波動及び 波動-粒子相互作用ロケット実験\*

松本 紘\*\*・宮武 貞夫†  
木村 磐根\*\*

Rocket Experiments on Nonlinear Wave-Wave and Wave-Particle  
Interactions in the Ionosphere by K-9M-41

By

Hiroshi MATSUMOTO, Sadao MIYATAKE,  
and Iwane KIMURA

**Abstract:** Controlled experiments on the nonlinear wave-wave and wave-particle interactions in the ionospheric plasma were performed by the Japanese sounding rocket K-9M-41. Ion acoustic waves excited by large amplitude electron plasma wave were found in the VLF wide band spectrograms whose spectra are very similar to those obtained by the K-9M-35 nonlinear wave-wave interaction experiment. In addition to these, banded LHR emissions were observed throughout the experimental period which, at a certain altitude, triggered 'risers' whose spectrum is very similar to that of ASE. After the electron beam with energy lower than 3 eV is ejected, periodic U-shaped discrete emissions were observed. The frequency of these emissions is lower than LHR frequency and decreases as the beam energy is increased. Generation mechanism of the U-shaped discrete emissions cannot be explained by any linear instability due to beamwave interaction.

## 1. 序

宇宙空間が天然のプラズマ大実験室である事が指摘されて久しい [1]。最近ではSpace Shuttle 計画で大規模な実験室を電離層の真っ只中へ打上げようとしている [2]。

我々も電離層プラズマ中における Passive な観測事業につけ加えて Active 実験が是非必要である事を主張して来た。K-9M-29号ロケットによるプラズマ波動に関する伝搬実験の

---

\* 宇宙研特別事業費による論文

\*\* 京都大学工学部

† 電気通信大学

際、電子領域プラズマ波とイオン領域プラズマ波間の非線形相互作用と思しき兆しが見いだされた[3][4]。その後K-9M-35号ロケットによって本格的な非線形プラズマ波動実験が行なわれ、大振幅電子プラズマ波の非線形崩壊によってイオン音波が励起される事が成功裡に示された[5][6]。その実験では、理論的に示されている非線形三波プロセスの周波数並びに波数関係が満足される特定の高度の領域のみでイオン音波が励起され得る事が確認された。又特筆すべき事に励起されたVLF帯のイオン音波のスペクトルは、いわゆるVLFエミッションのライザー(risers)やフォールー(fallers)やフック(hook)のスペクトルに非常に良く似ていた。

非線形プラズマ波動に関する研究はAlouetteやOGO等の人工衛星データを用いても進められている[7][8]がその他地上のシミュレーションチェンバーを用いた実験も数多く行なわれている[9]。我々もロケット実験と相補的な実験を行なうべく幾つかの地上シミュレーション実験を行ってきたが[4][10]、ここでは紙面の都合上、ロケット実験についてのみ報告することとする。

本論文においては最近行なわれたK-9M-41号ロケットによるプラズマ波動実験について報告する。

## 2. 実験装置と実験の概要

K-9M-41号ロケットは1973年1月17日18:00LTに内之浦より打上げられた。そのPayload部の写真を図1に示す。我々の実験装置はNLP(Nonlinear Plasma Waves)と名づけられていた。そのブロック図を図2に示す。

実験は親子ロケットによって行なわれた。子ロケットには大振幅電子プラズマ波を励振するために、8MHz、10VppのRF波が一組の送信メッシュに印加されていた。又、親子連絡(MDC: mother-daughter communication)は400MHzで行なわれ、8MHz送信プラズマ波の位相を親ロケットに伝送することによって伝搬する電子プラズマ波の波長測定が行なわれる予定であった。しかし不幸なことにMDCの故障によりこの波長測定並びに非線形三波プロセスの周波数関係の検出は失敗に終わってしまった。

VLF帯(即ちAF帯のプラズマ波の検

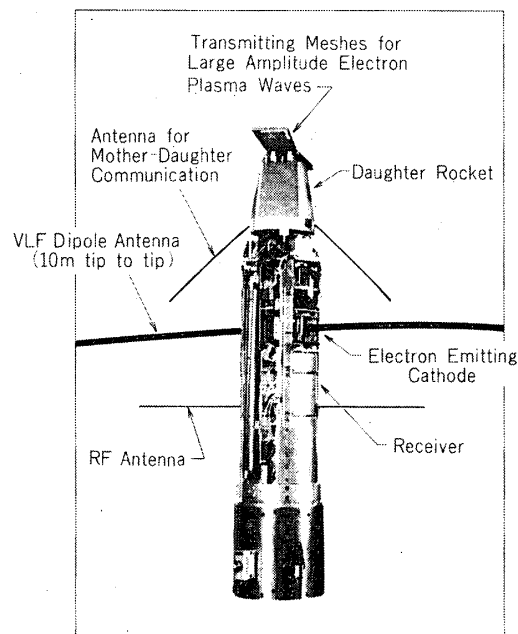


図1 K-9M-41号ロケットの頭胴部の写真とNLPに関する装置の説明



実験は他の実験装置と時分割で行なわれたので、我々のNLPに割当てられた区間は図5に示す(I)~(VI)までの6区間であった。(I)と(VI)の例外区間を除いて(II)~(V)の4区間は33秒間で、その間に図3に示したようにDCバイアスが1秒1Vステップで10Vまで3回変化させられた。(I)ではその繰返しが5回、即ち55秒間行なわれた。

A点でノーズコーンが展開され、10mアンテナの展開が開始された。10mアンテナは(I)の領域にロケットが到達する前に展開終了していた。子ロケットのメッシュに対する8MHz(10Vpp)の印加はA点で開始されていた。子ロケットは領域(III)のC点までは図1に示すように親ロケットに接続されたままで飛行し、C点で切離しが行なわれ秒速10cmでロケットより蹴出された。領域(I)のB点で実験タイミングのリセットが行なわれ、その時から電子ビーム電流が流れ始めた。

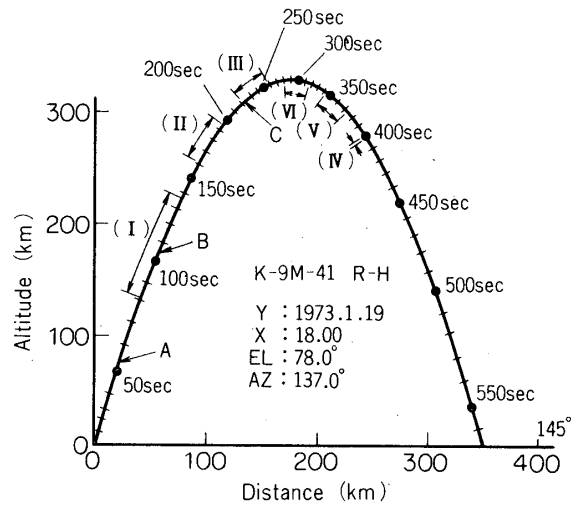


図5 K-9M-41号ロケットの飛跡とNLPの実験領域

### 3. 非線形波動—波動相互作用実験

先に述べたように、親子ロケット間の通信装置が故障したため、子ロケットの8MHz大振幅電子プラズマ波送信によるVLF帯プラズマ波励起の情報は、図2のブロック図に示した広帯域テレメータ出力に限られてしまった。しかしそのスペクトルの中には非常に多くの興味あるものが見い出された。本報告中には実験期間中のスペクトルの全てを掲載できないのでその一部について報告することとしよう。得られた全てのスペクトログラムは他誌に発表されている。[11]。

#### 3.1 大振幅電子プラズマ波によるイオン音波

我々は既にK-9M-35号機によって、電離層プラズマ中の特定の高度で、大振幅電子プラズマ波によって、イオン音波が励起されることを報告した[5][6]。その場合、PSDを用いて非線形三波プロセスの周波数関係が満足されている事も確認された。その時のイオン音波のスペクトルを図6に示す。いわゆるVLFエミッションに似たライザーやフックが励起されていた。

K-9M-41号機の受信スペクトルの中にK-9M-35号機で受信されたイオン音波と非常に良く似たものが見い出された。それを図7に示す。K-9M-35号機の場合は、受信は直径2cmの球で行なわれたのに対しK-9M-41号機の場合は10mダイポールアンテナで受信が行なわれた。従って図7には電磁波モードのホイッスラーも数多く受信されている。図6と図7のスペクトルの酷似性から、図7の中のフックやライザーはやはり大振幅電子プラズマ波によって非線形励起されたイオン音波と考えられよう。

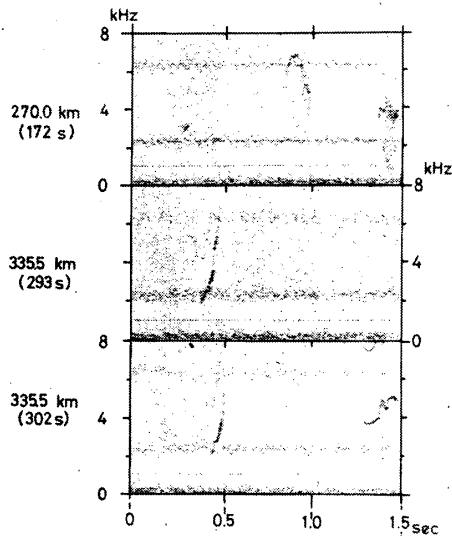


図6 K-9M-35号機で得られたイオン音波のスペクトル。受信プローブには0.5秒に0~10Vまでの三角状DCバイアスが印加されていた。大振幅電子プラズマ波の周波数は10MHz(0~0.5秒), 9MHz(0.5~1.0秒), 9.8MHz(1.0~1.5秒)であった。

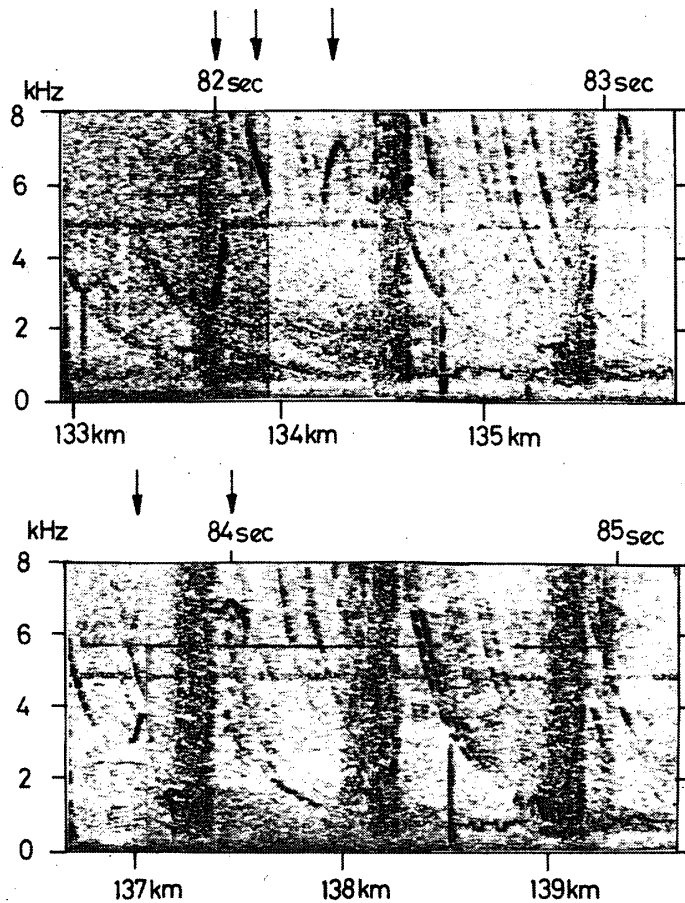


図7 K-9M-41号機で受信されたVLF帯スペクトル。ホイッスラー以外にK-9M-35号機で受信されたイオン音波のスペクトルと良く似たプラズマ波が見い出される(矢印)。5.8 kHz付近の横線はソナグラムのノイズである。又800 Hz付近に現われている城壁状の波はFSK信号のようである。

### 3.2 LHR波によるトリガード・エミッション

電子ビーム電流が流れ始める前には前記のイオン音波の他に幾つかの興味あるプラズマ波エミッションが見い出された。その中の1つにLHRエミッションにトリガーされた Triggered エミッションがある。図8にそのスペクトルを示す。白矢印で示されたバンド巾約

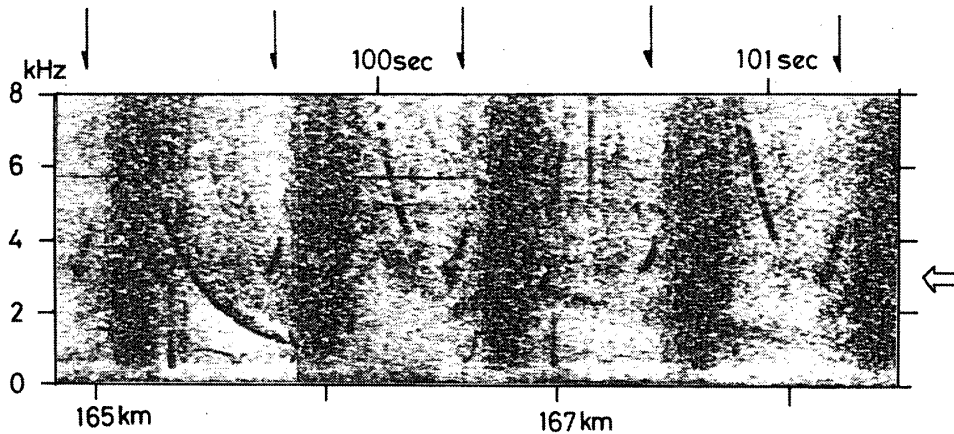


図8 LHRエミッションにトリガーされたライザー。← (白矢印)で示されよLHRエミッションからロケットの半スピン周期毎にライザーがトリガーされている。白矢印のLHRエミッションは図9の白矢印のLHRエミッションと同一の物である。

500 Hzのバンド構造のエミッションは後述するようにその上限カットオフ周波数がLHR周波数に一致するLHRエミッションである。そのLHRエミッション( $\sim 3.5$  KHz)からトリガーされているライザーが黒矢印で示されるようにロケットの半スピン周期毎に観測された。このトリガード・エミッションのスペクトルはいわゆるVLF帯単一周波数の人工信号にトリガーされて発生するASE (Artificially Stimulated Emissions) のスペクトルに良く似ている。しかしトリガー波に相当する波はASEとは異なり静電的なLHR波であることが異なっている。このような現象は我々の知る限り、未だ宇宙空間プラズマ中では見い出された事がなく、大へん興味深い。理論的説明は今後の問題とする。

### 4. 低エネルギー電子ビームによる波動-粒子相互作用実験

図5に示したように電離層E層とF層の中間の領域I)の途中B点から電子ビーム電流が流れ始めた。電子ビーム電流の流れ始めた時から受信VLF帯のスペクトルの様相は急激に変化し図7, 8に示したような種々のエミッションを含んだものから、図9に示すようなものとなった。即ち図7, 8に見られたライザーやフックやトリガードエミッションは消えうせ、代わりにLHRエミッションより低い周波数領域にU字形をしたdiscreteエミッションが受信されるようになった。図中白矢印で示されたLHRエミッションだけは電子ビーム電流のON, OFFに拘らず受信されていた。図9のようなU字形エミッションは領域VI)の終了時の電子ビーム電流が切られる時点まで続いた。

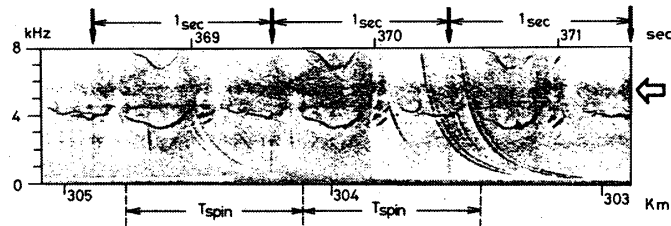


図9 LHRエミッション (⇐白矢印) とU字形をした周期的ディスクリット・エミッション。U字形エミッションは電子ビームにより励起された。

このU字形エミッションはロケットの1スピン周期に二度の割合に出現している。そのうちより低い周波数に到達する方のU字エミッションの最低周波数を読み取り、高度及びDCバイアスに対する変化をプロットしたものを図10に黒点で示す。同図にはLHRエミッションの上部カットオフ周波数をエラー棒付の白丸で示し、観測された電子密度及び地球磁場より計算されたLHR周波数  $f_{LHR}$  を実線で示してある。但しLHR周波数の計算に際し、イオン構成は160 km以下では  $O_2^+$ 、210 km以上では  $O^+$  のみとし、中間領域では両者が直線的に変化しているものとした。

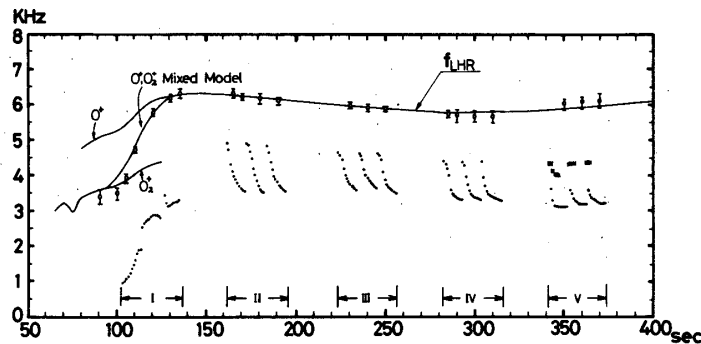


図10 LHR周波数(実線)とLHRエミッション(白丸)とU字形エミッション(黒丸)の周波数変化。下降する黒丸の一団は11個の点より成り、DCバイアスが0Vから10Vまで変化した時の周波数の変化を示している。

図10に見られるように、受信アンテナに印加されたDCバイアスを0Vから10Vにまで変化させた場合、U字形エミッションの周波数は順次低下している。これはDCバイアスを変化させることによってロケット電位が変化し、熱陰極と周囲のプラズマ電位の差が0.5Vから3V程度まで変化したことによるものと思われる [11]。

このU字形エミッションの特徴をまとめると次のようになる。

- 1° エミッションのバンド巾は非常に狭く約50 Hz程度である。
- 2° 周波数は周囲のプラズマのLHR周波数より必ず低い。即ち  $f < f_{LHR}$

- 3° エミッションのスペクトルはU字形をし、半スピン周期毎に一つのU字形が繰返される。1スピン中に現われる二つのU字形エミッションのうち一方は他方より周波数が若干高い(図9参照)。
- 4° エミッションは3eV以下の低エネルギー電子ビームによって励起され、ビームのエネルギーが大きい程、周波数は低い。
- 5° エミッション周波数は実験領域Ⅱ~Ⅴの間で程んど変化を示していない。然るにロケットのスピード、即ちイオンのドリフト速度はこの間に2 km/s から600m/s 程度まで大巾に変化している。

以上のような特長を説明できるような低エネルギー電子ビームによるビーム・インスタビリティは、静電的プラズマ波(イオン音波やイオンサイクロトロン波)においても、電磁的プラズマ波(ホイッスラーモード波)においても、線形理論の範囲では考えにくい[12]。従ってこのエミッションも多分に理論的興味を刺激してくれよう。

## 5. 結 言

本報告では1973年に行なわれたK-9M-41号ロケットによるプラズマ波動実験の結果について一部を報告した。親子ロケット間の連絡が跡絶えたので、非線形波動相互作用に関する周波数関係、波長測定には失敗したがVLF帯のスペクトル中に数多くの新しいプラズマ波エミッションが発見された。それらのあるものは非線形波動相互作用によるものであり、あるものは、ロケットから放出された低エネルギー電子ビームによるものである。これまでの我国のプラズマ波動ロケット実験では今回得られたような十分なスペクトルは得られていなかった。今回の成功の主な理由は、DCバイアスを印加し十分感度をあげた10mにも及ぶ長大アンテナの使用によるものと思われる。ロケットの近傍の乱れた領域外の情報を取り得ることの他に、ビーム等によるエミッション発生に必要な距離をかせぐことが出来る等がその原因と思われる。

しかし今回得られたエミッションの多くは、線形理論では説明され得ず、新たに非線形理論の展開が要求されよう。

## 謝 辞

本ロケット実験の遂行に当り多大の御援助、御協力をいただいた東大宇宙研、大林辰蔵教授、河島信樹助教授を始めとするロケット実験班の方々に深く感謝します。

又、同ロケットの相乗り機器の実験を担当された東北大学、大家寛教授には、内之浦での苦勞に際し、心暖まる御援助を頂いた。感謝の意を表します。

データ解析に当り、京都大学松尾敏郎技官、長尾朋大学院学生に支援していただいた事を感謝します。

1974年7月30日



## 参 考 文 献

- [1] 例えば大林辰蔵「宇宙空間物理学」 裳華房 1970.
- [2] F. L. Scarf, R. W. Fredricks, A. Rosen, J. M. Sellen and J. L. Vogel, A Report on the Plasma Physics and Environmental Perturbation Laboratory for the Space Shuttle Missions, Space Science Department, TRW Systems, California,(1973)
- [3] 松本紘, 橋本弘蔵, 木村磐根, K-9M-29 親子ロケットによるVLF帯電波伝搬実験, 日本地球電磁気学会 47回予稿集, 122 (1970)
- [4] H. Matsumoto, S. Miyatake and I. Kimura, Fundamental Experiments on Wave Phenomenon in Space Chamber Plasma, Rept. Ions. Space Res. Japan **25**, 40(1971).
- [5] 宮武貞夫, 松本紘, 木村磐根, K-9M-35号機による非線形プラズマ波動相互作用の実験, 東京大学宇宙航空研究所 報告8, 108 (1972).
- [6] S. Miyatake, H. Matsumoto and I. Kimura, Rocket Experiments on Nonlinear Wave-Wave Interaction in the Ionospheric Plasma, Space Res. **14**, 26 (1974).
- [7] H. Oya, Verification of Theory on Weak Turbulence Relating to the Sequence of Diffuse Plasma Resonance in Space, Phys. Fluids **14**, 2487 (1981).
- [8] H. Oya, Generation Mechanism of Proton Cyclotron Echos due to Pulse Radio Frequency Waves in Space Plasma, to be published in J. Geophys. Res.
- [9] 例えば大林辰蔵, 松本紘, プラズマ波動班報告 (1969~1973), スペースプラズマ専門委員会プラズマ波動研究班, 東京大学宇宙航空研究所 (1974).
- [10] H. Matsumoto, S. Miyatake and A. Kanemasa, Nonlinear Characteristics of Large Amplitude Bernstein Waves, Phys. Letters **48A**, 195 (1974).
- [11] H. Matsumoto, S. Miyatake and I. Kimura, Frequency Spectra of VLF Plasma Waves Observed by Japanese Sounding Rocket K-9M-41, Rept. Ionos. Space Res. Japan. **28**, 121 (1974).
- [12] 松本紘, 宮武貞夫, 長尾朋, VLF放射に似た人工的プラズマ波励起のロケット実験, 電子通信学会アンテナ伝搬研究会資料 AP..73-93 (1974)