

# 低エネルギー電子ビーム放出による 波動-粒子相互作用ロケット実験の解析\*

松本 紘\*\*・木村 磐根\*\*・宮武 貞夫†

Analysis of Sounding Rocket Experiment on Wave-Particle Interaction  
using a Low Energy Electron Beam

By

H. MATSUMOTO, I. KIMURA and S. MIYATAKE

**Abstract :** In the K-9M-41 rocket experiment performed on January 17, 1973, VLF plasma waves were observed in association with the ejection of an electron beam of energy  $\sim 3\text{eV}$ . An electron beam of several tens of  $\mu\text{A}$  was emitted from a hot cathode through a potential sink of the rocket body, when a positive DC bias was applied to a receiving dipole antenna in order to increase the efficiency of the antenna by removing an ion sheath around the antenna.

The VLF noise has a frequency spectrum resembling the shape of the letter "U", which appeared twice per spin period of the rocket. The emission frequency is always lower than the local LHR frequency, and the minimum frequency of each U spectrum decreases with increasing energy of the electron beam. The frequency of each U shape, which varies synchronously with the rocket spinning, is found to decrease with increasing energy component of the beam in the direction of the geomagnetic field. With regard to the generation mechanism, the ion acoustic or ion cyclotron harmonic modes generally have a phase velocity too slow for the interaction, and the electromagnetic (modified Alfvén) mode which propagates along the geomagnetic field line, has no dispersion which prevents it from interacting with the beam. For the electromagnetic mode propagating almost perpendicular to the geomagnetic field, there is a possibility of interacting with the low energy electron beam.

## 1. 序

最近、宇宙空間飛翔体を用いたプラズマの Active 実験が幾つかなされている。我々も電離層プラズマ中で観測ロケットを用い、プラズマ波動に関する幾つかの Active 実験を行な

\* 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

ってきた [1]~[6].

本論文では, K-9M-41号機で行なわれた低エネルギー電子ビームによるVLF帯プラズマ波励起実験の解析結果を報告する. 電子ビーム打込みのロケット実験は Cartwright and Kellog [7]~[9], Winckler等 [10] [11] や Hess等 [12] [13] によって行なわれた他, 最近ではフランスソ連の共同実験 ARAKS によっても行なわれた [14]. これらの実験における電子ビームのエネルギーは数 keV ないし数十 keV であった. これに対し, 我々の実験は数 eV 以下の低エネルギー電子ビームを用い, 非常に興味あるプラズマ波励起を観測したものである. このような低エネルギー電子ビームによって励起されたプラズマ波の発生機構は, まだ明解にはされていないが, エミッションの周波数の決定には, 電子ビームの地球磁力線方向の速度成分が重要な役割を果していることが判明した.

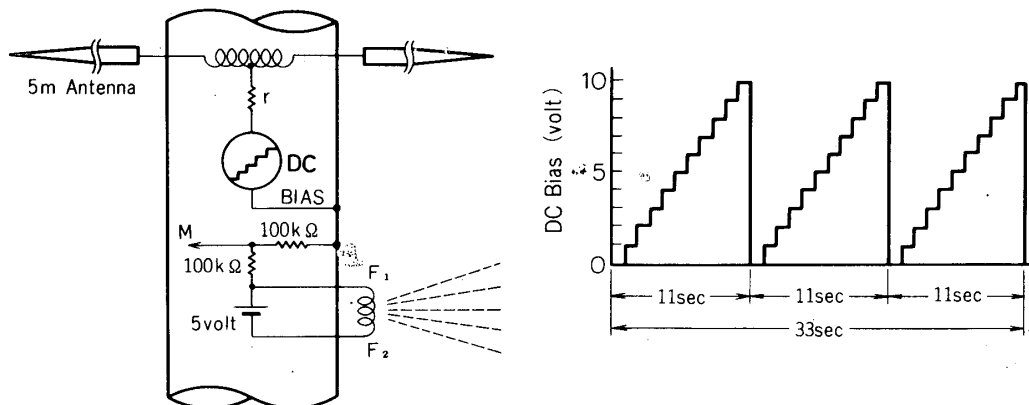
## 2. 実験の概要

本実験は, 1973年1月17日18時00分LTに鹿児島県内之浦の東大宇宙空間観測所 (KSC) より打上げられた. K-9M-41号ロケットにより遂行された. ロケットは高度330kmに達した.

ロケット表面に取付けられたタングステン線の熱陰極から電子放出が行なわれ, VLF帯 (100Hz~28kHz) のプラズマ波観測が, 10mダイポールアンテナ (片側5m) に接続されたVLF広帯域受信機によって行なわれた. この10mアンテナには0~10VまでのDCバイアスが1秒間に1Vの割合で階段状に印加された.

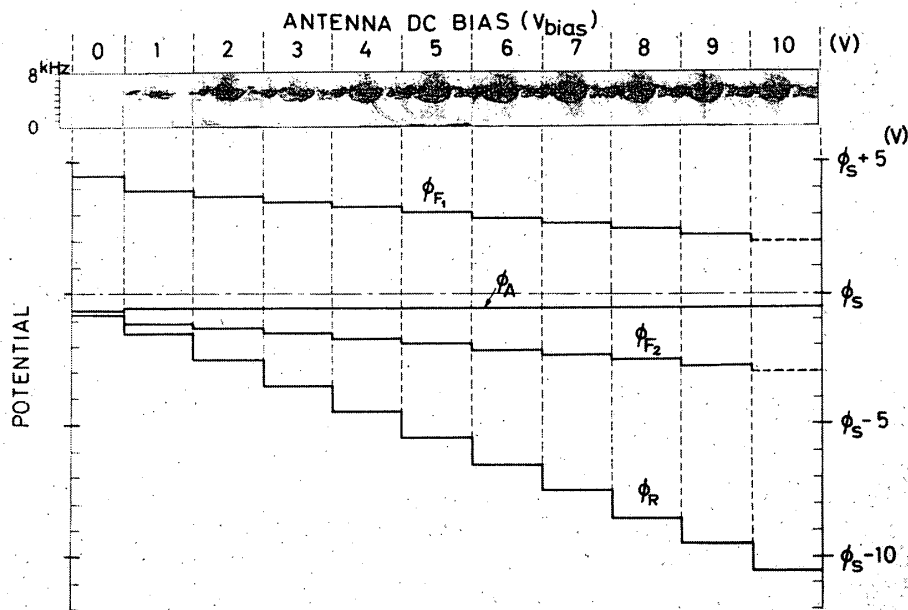
全ロケット表面積の約15%にも達する表面積を有する10mアンテナに正のDCバイアスを印加したため, ロケット電位が沈下し, 従って熱陰極から放出された熱電子はプラズマ電位まで加速され, 低エネルギー電子ビームを形成し, それが翔って幾多のプラズマ波エミッションを生み出したと考えられる. 電子放出用熱陰極並びに10mアンテナDCバイアス回路を第1図(a)に, DCバイアスのタイム・シーケンスを第1図(b)に示す.

各DCバイアス電圧に対するロケット, アンテナ及び熱陰極端  $F_1$ ,  $F_2$  のプラズマ電位  $\phi_s$ ,



第1図 (a) 熱陰極とDCバイアス用回路構成

(b) DCバイアスのタイム・シーケンス



第2図 0~10Vまで変化するDCバイアスの1シークウェンスに対するプラズマ波スペクトルの1例とそれに対応するプラズマ電位( $\phi_S$ )に対する熱陰極電位( $\phi_{F1}$ ,  $\phi_{F2}$ ), アンテナ電位( $\phi_A$ )及びロケット電位( $\phi_R$ )の変化。

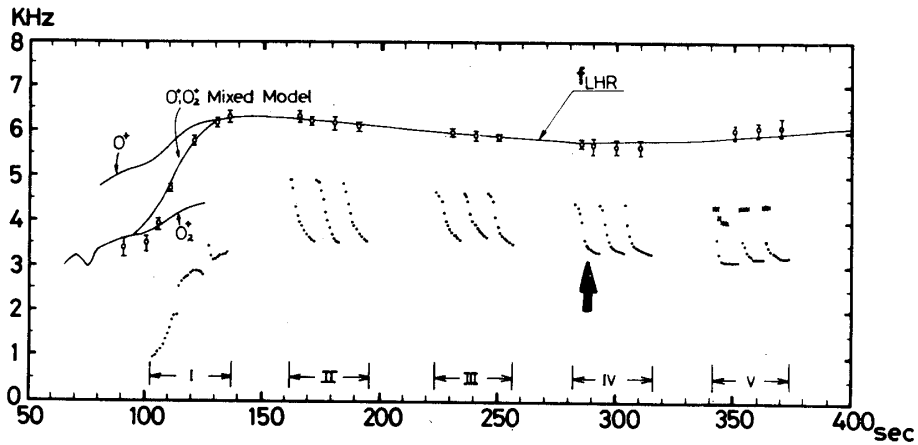
に対する相対電位を計算した結果を第2図に示す。同図の最上部には対応するVLF帯プラズマ波エミッションのスペクトルの一例を挙げている。図から明らかなように電子ビームの最大エネルギーは約3eV程度であったと推定される。又、電子ビーム電流は数 $10\mu\text{A}$ であった。実験の詳細は他の論文に譲ることとする[3], [4]。

### 3. 低エネルギー電子ビームによって励起されたVLFプラズマ波エミッション

第2図の最上部にロケットが最高高度付近に存在した283秒から294秒間に観測されたVLF帯エミッションのスペクトルを示した。通常のホイッスラーの他、スピンの同期して変動する二種類のエミッションが見られる\*。

1つは打上げ後85秒にアンテナが展開されてから以後ずっと観測された広帯域ヒス状のエミッションで、その上限カットオフ周波数が第3図に誤差棒付きの白丸で示されている。同図に実線で描かれている $f_{\text{LHR}}$ 曲線は、観測された電子密度から計算されたLower Hybrid Resonance (LHR)周波数である。図に見られるように両者は非常に良い一致を示している。従ってこのバンド状のエミッションはいわゆるLHRエミッション[15]~[17]と非常に良く似ているが、通常のLHRエミッションは下限のカットオフ周波数がLHR周波数と一致している。この意味で今回観測されたバンド状のエミッションを準LHRエミッション(quasi LHR emissions)と呼ぶこととする。Beghin and Debrie[18]は親子ロケット間の送受信実験を行ない、送信波の周波数が広帯域スペクトルを有していても約100m離れた子ロケット

\* スピン周期は0.971秒で、たまたまDCバイアス変化の周期0.999秒と近かった。

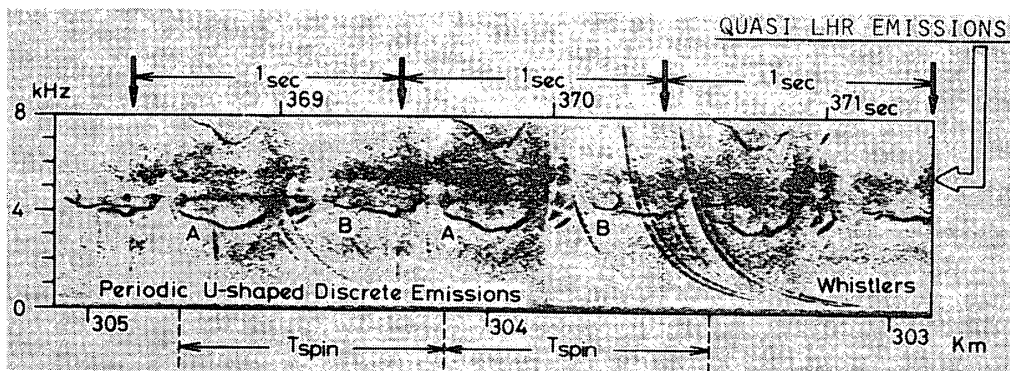


第3図 準LHRエミッションの上限カットオフ周波数(白丸)とU字型エミッションの最低周波数(黒丸)の高度及び時間変化. I~VはDCバイアスがアンテナに印加されていた時間間隔を示す

トで受信されるスペクトルはLHR周波数を上限カットオフとするバンド状のエミッションが受信された事を報告している. 彼等の実験は我々の観測した準LHRと関連があるようである.

もう一方のエミッションは準LHRエミッションよりやや低い周波数をもつU字型をした discrete エミッションである. このU字型エミッションは低エネルギー電子ビームが放出された時にのみ受信された. 第4図にU字型エミッションの拡大スペクトルを示す. 図から明らかのように, 1スピニング中にU字型エミッションは, 図中のA, Bで示されるように二度現われる. しかしAとBのグループのエミッションはその周波数及び継続時間共互いに若干異なっている. このことはエミッション発生を制御している要因が引続く半スピニング周期毎に異なることを示唆している.

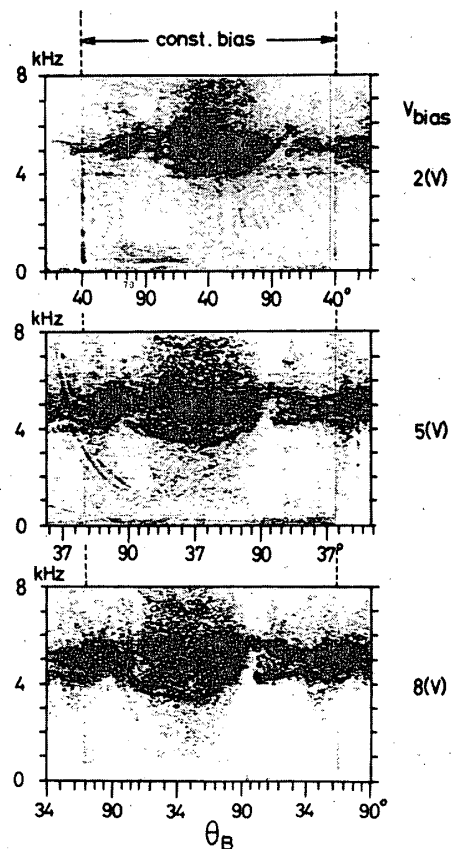
U字型エミッションAグループ(周波数が低い方)のU字型の底に当る最低周波数が各DCバイアスの値に対し第3図の黒点で示されている. 黒点の1つの集団は0~10Vまで1V



第4図 準LHRエミッションとU字型 discrete エミッションの詳細スペクトル

きざみの11点のDCバイアスに相当している。第2図と第3図の一群の右下りの黒点の傾向からU字型エミッションの最低周波数は電子ビームエネルギーが上昇するにつれて下ることを示している。

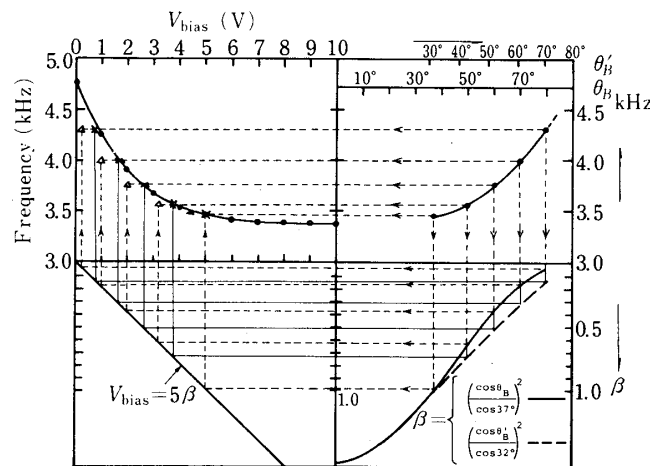
一方個々のエミッションのU字型周波数変化とロケットのスピンの関係が第3図の矢印で示した一群のエミッションについて詳しく調べられた。第5図にDCバイアスが2V, 5V, 8Vの時のU字型エミッションのスペクトル例を示す。横軸 $\theta_B$ はロケット表面に取付けられた熱陰極面の法線方向と地球磁場の成す角度である。図に見られるようにU字型エミッションの周波数は $\theta_B$ が極小値となる近傍で最小となり、 $\theta_B$ が $90^\circ$ 近傍の値を示す時に最大値を示している。また、 $\theta_B \simeq 90^\circ$ の時にはU字型エミッションは消えてしまっている。しかしスペクトルの中央の右側の $90^\circ$ 近傍ではこの消滅は明らかであるが、左側の $90^\circ$ 近傍では明らかでなくむしろエミッションはぼんやりしているが連続しているようにも見える。ロケットの姿勢データとの比較の結果この左側の $\theta_B \simeq 90^\circ$ 付近では熱陰極がロケットのWake側に存在していたことが明らかにされた。従ってこの非対称性はロケットのWake効果によりもたらされたものである。



第5図 熱陰極面法線と地球磁場とのなす角 $\theta_B$ の関数としたU字型エミッションの周波数変化

#### 4. 電子ビーム・エネルギーとU字型エミッションの周波数の関係に関する考察

前節でU字型エミッションの最低周波数がDCバイアスの上昇と共に下る事を第3図の矢印で示された一群に対してこの最低周波数対アンテナ印加DCバイアス電圧を第6図の左上欄に黒点及びそれを結ぶ実線で示す。一方、U字型エミッションの周波数は電子ビーム放出用熱陰極面法線と地球磁場とのなす角度 $\theta_B$ の関数であることを第5図で示した。同図の $V_{bias} = 5$  (V) の場合のスペクトルの真中のU字型エミッションの周波数を $\theta_B$  に対しプロットしたものを第6図の右上欄に黒点及びそれを結ぶ実線で示す\*。



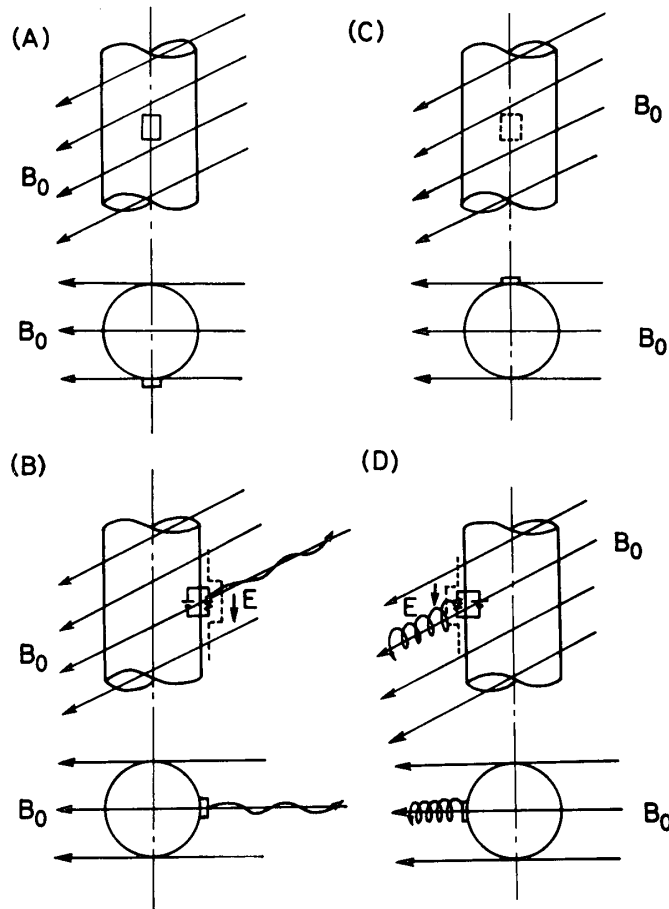
第6図 U字型エミッションの周波数とDCバイアス及び $\theta_B, \theta_B'$ の関係

この二つの実験曲線から、U字型エミッションの周波数が放出された電子ビームの地球磁力線に沿う速度成分で制御されていることを以下に示す。

第一次近似として放出電子ビームの速度ベクトルの方向は熱陰極面法線と一致していると仮定しよう。この仮定の下では電子ビームの地球磁場に沿う方向の運動エネルギーは $(\cos \theta_B / \cos \theta_{Bmin})^2$  に比例する。但し $\theta_{Bmin}$  はロケットの半スピン中の $\theta_B$  の極小値を示す。従って、第6図の下半分にある曲線、直線を用いれば、右上欄の関係は左上欄の三角印で示されるような、電子ビームの磁場方向運動エネルギー対周波数の関係に書き直される。この三角印が左上欄の実線と一致すれば、U字型エミッションの周波数が電子ビームの磁場方向速度成分で決定されていることが示されるが、左上欄に見られるように若干の不一致が見られる。

この不一致は、先述した電子ビーム速度の仮定に若干の誤りがあることに帰因している。第1図に示したように、熱陰極は直熱型のため熱陰極面に沿う電界が存在する。従って電子ビームの速度ベクトルと地球磁場との成す角 $\theta_B'$  は $\theta_B$  とは異なる。第5図においてU字型エミッションが消え去る瞬間に $\theta_B' = 90^\circ$  が実現されていると仮定すれば第6図の右上欄の横軸は図中の $\theta_B$  軸のように、修正され、U字型エミッション周波数のスピン依存曲線は同図左上欄の×印で示されたように書き直され、両者は非常に良い一致を示す。この事実は、このU字

\*  $\theta_B$  が極小を示す $\theta_B = 37^\circ$  を境にその両側の周波数の平均をとったもの。



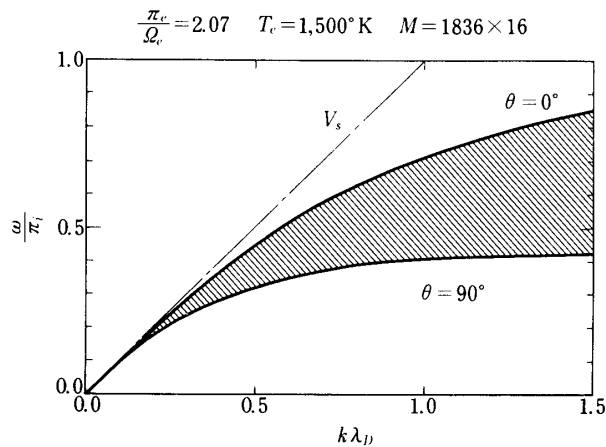
第7図 ビーム発射方向と地球磁場の相対関係 ((A)~(D)  
は1/4スピ周期毎の相対関係)

型エミッションの周波数が放出された電子ビームの地球磁場方向の速度成分で決定されていることを示している。

今検討を加えた熱陰極面に沿う電界を考慮すれば、ロケットが1スピ周期間に電子ビームがどのように放出されるかを描くことができる。それを模式的に第7図に示す。同図(C)、(D)に見られるよう相続く2つの半スピ周期では、放出される電子ビームのピッチ角、従って地球磁場方向の電子ビーム速度が異なる。このことが第4図に示したA、B両グループのU字型エミッションの周波数とその継続時間の差異の原因である。

##### 5. U字型エミッションの発生機構に関する理論的考察

前節では、U字型エミッションの周波数が放出された電子ビームの磁力線方向の速度成分で決定されていることを明らかにした。本節では、これに基づき、U字型エミッションの発生機構について若干の理論的検討を加えてみよう。



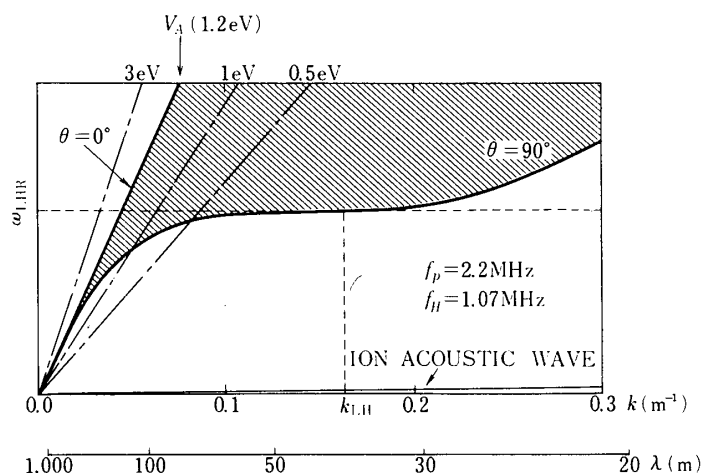
第8図 イオン音波の分散関係式

エミッションの周波数はLHR周波数 ( $f_{\text{LHR}}$ ) より低いので,  $f_{\text{LHR}}$  以下で伝搬するプラズマ波を考察の対象としよう. イオンとして  $0^+$  イオン一種類を考えた場合, イオンサイクロトロン周波数と  $f_{\text{LHR}}$  の間の周波数領域で伝搬可能なプラズマ波モードとしては, イオン音波(イオン・サイクロトロン波 [19] を含める) 及びホイッスラーモード (modified アルフヴェン波) である. 前者は静電波であり, 後者は電磁波である.

まず最初に静電波モードの不安定性の可能性を検討しよう. 第8図に第2図, 第4図, 第5図に示したエミッションが観測された高度における電離層プラズマパラメータの下でのイオン音波の分散関係を示す. 図中  $\pi_e$ ,  $\pi_i$ ,  $\Omega_e$ ,  $T_e$ ,  $\lambda_D$ ,  $M$ ,  $\theta$  及び  $V_s$  はそれぞれ電子プラズマ周波数, イオンプラズマ周波数, 電子サイクロトロン周波数, 電子温度, デバイ長, イオンの電子に対する比質量, 伝搬ベクトル  $k$  と地球磁場の成す角及びイオン音波の位相速度  $V_s = (\kappa T_e / m_i)^{1/2}$  である. 但し  $\kappa$  及び  $m_i$  はボルツマン定数及びイオン質量である. 斜線部分が  $\theta$  を変えたときに分散曲線が存在する領域である. 図より明らかのようにこの波の位相速度は非常に小さいため, このモードと結合できる電子ビームのエネルギーは 0.1 eV 以下の非常に小さい値でなければならない. イオン音波と電子ビームの結合による不安定性の数値計算がシフトしたマックスウェル分布電子ビームに対し行なわれた [20]. 計算の結果, イオン音波が電子ビームによって励起される条件は大へん厳しいことが明らかにされた. 即ち電離層中では電子ビームの必要運動エネルギーは 0.05 eV 程度でしかも電子温度が  $300^\circ\text{K}$  程度に低い必要があることが示された. 従って今回の我々のロケット実験で放出された電子ビームではイオン音波は励起され得ないことが明らかにされた.

第二に, U字型エミッションが電磁波モードであるとしてその発生機構を考察しよう. 観測されたU字型エミッションは, ロケット速度が  $0.8\text{ km/s} \sim 2\text{ km/s}$  まで変化したにも拘らず, ほとんどその影響による Doppler シフトを受けていない事からも電磁波モードであると考えられる. 第9図に modified アルフヴェン波の分散式を示す.  $\theta = 0^\circ$  と  $90^\circ$  と示された実線はそれぞれ主波で斜線領域は  $\theta \neq 0^\circ, 90^\circ$  の一般の角度で伝搬する波の分散曲線の存在領域である. 観測された電離層中でのアルフヴェン速度  $V_A$  は約  $8.5 \times 10^5 \text{ m/s}$  で, 電子の運動





第9図 modified アルフヴェン波の分散関係式

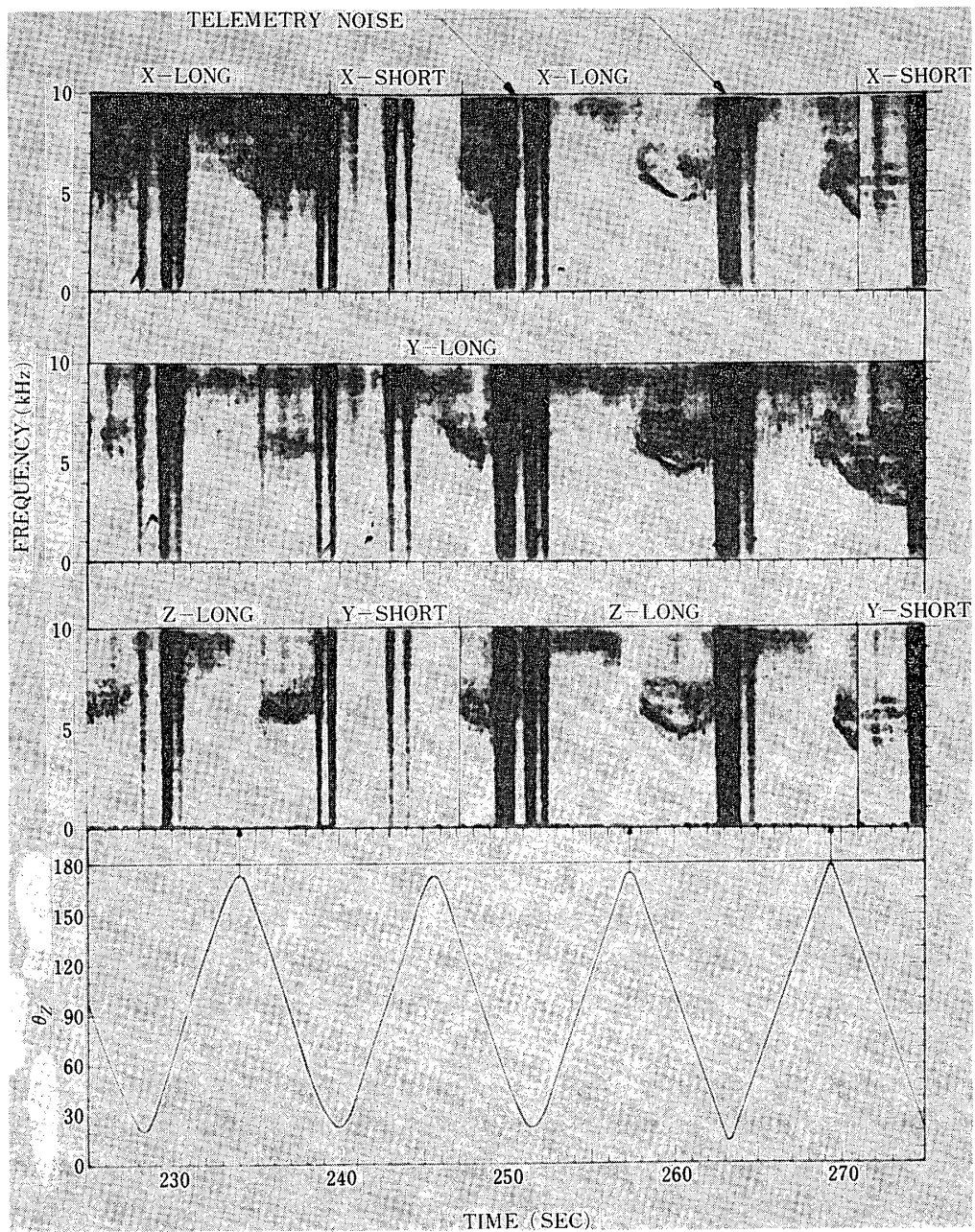
エネルギー換算で約 1.2eV である。一点鎖線で示した直線はそれぞれ 0.5eV, 1eV, 3eV の電子ビームの共鳴条件直線を表わしている。0.5及び 1eV の直線は  $\theta \simeq 90^\circ$  の波と  $f \lesssim f_{LHR}$  の周波数領域で分散曲線と交点を有するため、その交点付近で不安定が生ずる可能性がある。交点の存在のみで不安定性の存在は判断できない [21] が、0.5～1eV 程度の電子ビームで地球磁力線にほぼ直角に伝搬する modified アルフヴェン波（ホイッスラー波）が励起できる可能性をこの図は示している。この可能性については電子ビームを含めた分散式の解を求めねばならないが、それについてはここでは述べず次の機会に譲ることとしたい。

## 6. 検 討

低エネルギー電子ビーム放出によって励起されたU字型のエミッションは放出された電子ビームの地球磁力線方向の速度成分と密接な関係のあることを示し、その発生機構についても完全に成功はしていないが放出電子ビームと  $\theta \simeq 90^\circ$  のホイッスラー波の不安定性が十分可能性のあることを示した。

K-9M-41号機で見いだされたU字型エミッションと非常に良く似たスペクトルを持つプラズマ波がオーロラ中に打込まれた Javelin ロケットで見いだされていることに注目したい [22]。そのスペクトルを第10図に示す。Javelin ロケットでは電子ビームの放出は行なわれていなかったが、このエミッションと今回のU字型エミッションとは深い関連があるものと思われる。

最後に、今回の電子ビーム実験について技術的立場から次の事を強調しておきたい。高エネルギー電子ビームはロケット電位の制御の困難を伴うのに比し、低エネルギー電子ビーム放出は熱電子放出用陰極と、ダイポール受信アンテナにDCバイアスを印加するだけで良いという簡便さが長所となる点である。しかも電離層から磁気圏下部の領域では 2～3eV の電子ビームによって、電磁波から静電波までの広い範囲の波動-粒子相互作用の実験的研究を行なうことができる。この点に着目して現在我々は、スペース・シャトルを利用した低エネ



第10図 オーロラ帯電離層中で Javelin ロケットで観測されたプラズマ波スペクトル (after Gurnett and Mosier [22])

ルギー電子ビーム実験を提案している [23].

#### 謝 辞

本ロケット実験に際し御援助、御協力を頂いた東大宇宙研大林教授、河島助教授を始めと

するロケット実験班の方々に深く感謝致します。又磁気姿勢計のデータをいただいた東海大青山助教授に謝意を表します。

1975年9月30日

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] 宮武貞夫, 松本紘, 木村磐根, K-9 M-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).
- [ 2 ] S. Miyatake, H. Matsumoto and I Kimura, Rocket Experiments on Nonlinear Wave-Wave Interaction in the Ionospheric Plasma, *Space Res.* **14**, 26 (1974).
- [ 3 ] 松本紘, 宮武貞夫, 木村磐根, K-9 M-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, 東京大学宇宙航空研究所報告**10**, 577 (1974).
- [ 4 ] 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**, 89 (1974).
- [ 5 ] H. Matsumoto, S. Miyatake and I. Kimura, Rocket Experiment on Spontaneously and Artificially Stimulated VLF Plasma Waves in the Ionosphere, *J. Geophys. Res.* **80**, 2829 (1975).
- [ 6 ] H. Matsumoto, I. Kimura, S. Miyatake and T. Obayashi, Active Sounding Rocket Experiment, using  $\sim 3\text{eV}$  Electron Beams, on Wave-Particle Interaction, paper presented at 18th COSPAR Meeting, Bulgaria, (1975).
- [ 7 ] D.G. Cartwright and P.J. Kellog, Controlled Experiment on Wave-Particle Interaction in the Ionosphere, *Nature*, **231**, 11 (1971).
- [ 8 ] T.W. Jones and P.J. Kellog, Plasma Waves Artificially Induced in the Ionosphere, *J. Geophys. Res.*, **78**, 2166 (1973).
- [ 9 ] D.G. Cartwright and P.J. Kellog, Observation of Radiation from an Electron Beam Artificially Injected in the Ionosphere, *J. Geophys. Res.*, **79**, 1439 (1974).
- [10] R.A. Hendrickson, R.W. McEntire and J. R. Winckler, Electron Echo Experiment: A new Magnetospheric Probe, *Nature*, **230**, 564 (1971).
- [11] J.R. Winckler, An Investigation of Wave-Particle Interaction and Particle Dynamics using Electron Beam Injected from Sounding Rockets, *Space Sci. Rev.*, **15**, 751 (1974).
- [12] W.N. Hess, M.C. Trichel, T.N. Davis, W.C. Beggs, G.E. Kraft, E. Stassinopoulos and E.J.R. Maier, Artificial Aurora Experiment: Experiment and Principal Results, *J. Geophys. Res.*, **76**, 6067 (1971).
- [13] T.N. Davis, T.J. Hallinan, G.D. Mead, M.C. Trichel and W.N. Hess, Artificial Aurora Experiment : Ground Based Optical Observations, *J. Geophys. Res.*, **76**, 6082 (1971).
- [14] R. Gendrin, The French-Soviet "ARAKS" Experiment, *Space Sci. Rev.*, **15**, 905 (1974).
- [15] N.M. Brice and R.L. Smith, Lower Hybrid Resonance Emissions, *J. Geophys. Res.*,

- 70, 71 (1965).
- [16] R.E. Barrington and J.S. Belrose, Preliminary Results from the Very Low Frequency Receiver aboard Canada's Alouette Satellite, *Nature*, **198**, 651 (1963).
- [17] R.E. Barrington, J.S. Belrose and G.L. Neims, Ion Composition and Temperatures at 1000km as Deduced from Simultaneous Observations of a VLF Plasma Resonance and Topside Sounding Data from the Alouette 1 Satellite, *J. Geophys. Res.*, **70**, 1647 (1965).
- [18] C. Beghin and R. Debrie, Characteristics of the Electric Field far from and Close to a Radiating Antenna around the Lower Hybrid Resonance in the Ionospheric Plasma, *J. Plasma Physics*, **8**, 287 (1972).
- [19] S. Puri, F. Leuterer and M. Tutter, Dispersion Curves for the Generalized Bernstein Modes, *J. Plasma Physics*, **9**, 89 (1973).
- [20] 長尾朋, 電離層プラズマ中における波動-粒子相互作用ロケット実験とその理論的解析, 京都大学大学院工学研究科電気工学専攻修士論文(1974)
- [21] I. Kimura, Cerenkov Instability and VLF Emissions Generated Outside the Plasma-pause, *Rep. Ionos. Space Res. Japan*, **25**, 360 (1971).
- [22] D.A. Gurnett and S.R. Mosier, VLF Electric and Magnetic Fields Observed in the Auroral Zone with the Javelin 8.46 Sounding Rocket, *J. Geophys. Res.*, **74**, 3979 (1969).
- [23] H. Matsumoto, I. Kimura and S. Miyatake, Space Experiment with Plasma Accelerator for AMPS-Space Shuttle Project [III] ——Wave-Particle Interaction Experiments in the AMPS Project ——, paper presented at the 11th International Symposium on Space Technology and Science, Tokyo, (1975).