

# じきけん／サイプル局信号による 波動－粒子相互作用の実験†

木村 磐根\*・松本 紘\*・向井 利典  
橋本 弘蔵\*・守倉 正博\*・佐々木 主悦\*  
R.A. HELLIWELL\*\*・T.F. BELL\*\*・U.S. INAN\*\*  
J.P. KATSUFRAKIS\*\*

Exos-B/Siple Station Wave-Particle Interaction Experiments  
By

Iwane KIMURA, Hiroshi MATSUMOTO, Toshifumi MUKAI,  
Kozo HASHIMOTO, Masahiro MORIKURA, Chikara SASAKI,  
R.A. HELLIWELL, T.F. BELL, U.S. INAN and J.P. KATSUFRAKIS

**Abstract:** In situ measurements of both energetic particles and VLF waves have been carried out in a joint program involving the Japanese satellite EXOS-B and the Siple Station VLF transmitter. A general description of the experiment is given as well as some results concerning wave-particle correlations. Telemetry data acquisition was made by NASA tracking stations during summer in 1979 and during the succeeding winter. This report describes mainly the results of the summer experiment. The Siple signal was detected on about 32% of the observed passes. Siple triggered emissions (ASE) were observed on five passes concentrated in a period from August 14 to 18, while it was geomagnetically quiet after a large magnetic storm on August 13. There were two types of Siple ASE; one is due to a direct triggering, which is normally found in the ground observation, and the other is one triggered by echoing signals, which is not popularly found on the ground. Siple signals triggered ASE when the signal frequency was around half the equatorial cyclotron frequency and electron flux was large for all observed energy channels. The observed delay time of the Siple signal from the transmitter to the satellite can be interpreted by either ducted or non-ducted propagation.

---

\* 京都大学工学部

\*\* スタンフォード大学

† 宇宙研特別事業費による研究論文

## 1. はじめに

地上のVLF局信号によって磁気圏内の荷電粒子との間で起る波動-粒子相互作用は、トリガード放射あるいは人工励起放射(ASE)の現象として地上で観測されているが、これを日本の科学衛星じきけんにより磁気圏中で波動と粒子を同時に観測しようという計画が立てられ[1]、1979年7~9月並びに12月~1980年1月に実施された。これは南極サイプル局によるVLF信号を用いるものであり、米国スタンフォード大学との共同実験として行われ、又テレメータ受信はサイプル局の磁気子午面に近い点での受信が望ましく、夏期間はノースカロライナ州ローズマン局、引続く冬期間は南米のサンチャゴ、キトー局によって行われたが、これらはすべてNASAのご好意によるものである。

データのあらましの解析は一通り終えたが、明らかにサイプル信号による波動-粒子相互作用の起ったと思われるイベントはすべて8月中旬に集中しており、冬期の実験ではみつからない。勿論冬期の実験でも自然のVLF放射やホイスラーで興味ある現象はみられるが、本報告では夏期の結果のみについて概略をのべる。

なお、この実験の結果については一部既に他の機会にも報告している[2][3]。

## 2. サイプル局信号

サイプル局(地理緯度経度: 75.2°S, 83.9°W, 地磁気経度6°, L~4)は1979年3月から新しい送信設備が入れられ、実験には130 KW程度が用いられた。周波数は1.5~20 KHzの間可変であるが、実験中は3.9~6.5 KHzの範囲が多く、特に送信電力が最大である5.05 KHzが最も多く用いられた。

上記の周波数は中心周波数で、この上下500 Hzの範囲で周波数が1秒又は2秒を単位に計算機制御により様々に変化される。もち論key downに相当した一定周波数に保たれる時間もある。この送信周波数パターンは時間に対して定まっており、受信信号の周波数パターンと送信波のそれを比べることにより、50 msec以下の精度で信号伝搬時間が決定できる。

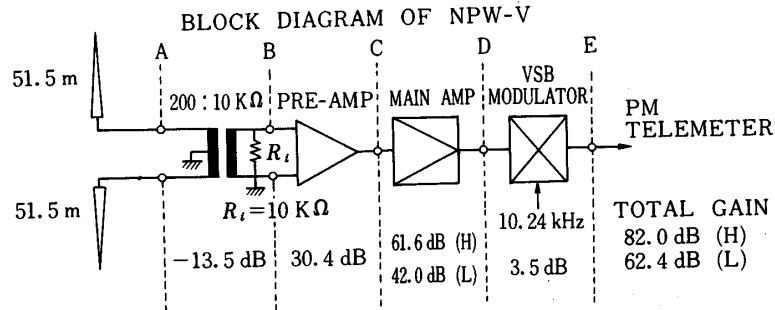
サイプル局はじきけん衛星の軌道に応じて送信スケジュールが決められた。又送信周波数(中心)はサイプル局で適宜変えられ、又スタンフォード大学からATS-3局を通して実験中にも指令が出され、周波数の変更も可能であった。ローズマン局とスタンフォードの間は電話回線でVLFスペクトルのうち2 KHz巾のものが実験中リアルタイムで送られ、互連絡もなされた。

## 3. じきけん衛星観測装置

### 1) VLF波観測(NPW-V)[3]

VLFスペクトル観測は全長103 mのダイポールが主に用いられたが、ループアンテナ(15 cmφ100回巻)も実験期間初期に数回用いられた。受信機の各部の利得は第1図のようになっている。ダイポール側の入力トランスの入口に換算した増巾器総合の飽和レベルは、5 KHz付近で高利得時約38 dBμ、低利得時58 dBμ、又ダイナミックレンジは約50 dBである。

アンテナの実効長はほぼアンテナ長の半分すなわち51.5 mであるが、アンテナ周囲のシース容量と入力インピーダンスとの分割のため実効長は約23 mとなり、上記の飽和レベル



第1図 VLF受信機(NPW-V)のブロック図。  
(各部利得は5 KHzでの値)

に対応する信号電界強度は高利得時  $3.5 \mu\text{V}/\text{m}$  となる。

VLF受信機の出力はドップラー観測DPLの出力と0.95 : 0.25の比で混合され、計最大1.2 radの位相変調(PM)されて400.5 MHzで送信される。実験時には、地上テレメータ局で校正信号として5 KHzで0.7 radの変調をした400.5 MHzのテスト信号をテレメータ受信機に入れ、その位相検波出力の5 KHzの信号をVLF用データレコーダのテープの一部に記録し、これをVLFレベル校正信号として用いた。このレベルは入力(アンテナ直後)に換算して高利得時  $36 \text{ dB}\mu (= 63 \mu\text{V})$  に相当する。従って、電界強度に換算すると  $2.7 \mu\text{V}/\text{m}$  となる。

受信機の周波数特性は5 KHzがピークで1 KHzでは4 dB、0.2 KHzで6 dB、10 KHzで2 dB下る。

#### ii) 粒子観測(ESP)

全観測期間にわたり電子及びイオンの観測がVLF波観測と同時に行われたが、電子は0.3~9.5 KeVの間13チャンネル、イオンは9~29 KeVの範囲13チャンネルで計測され、いずれもPCM伝送される。

上記VLF、及び粒子観測装置はOG(organized command)により17分4秒単位の整数倍の時間サイクルの子午面付近でスイッチオンされた。用いられたOGは主に、

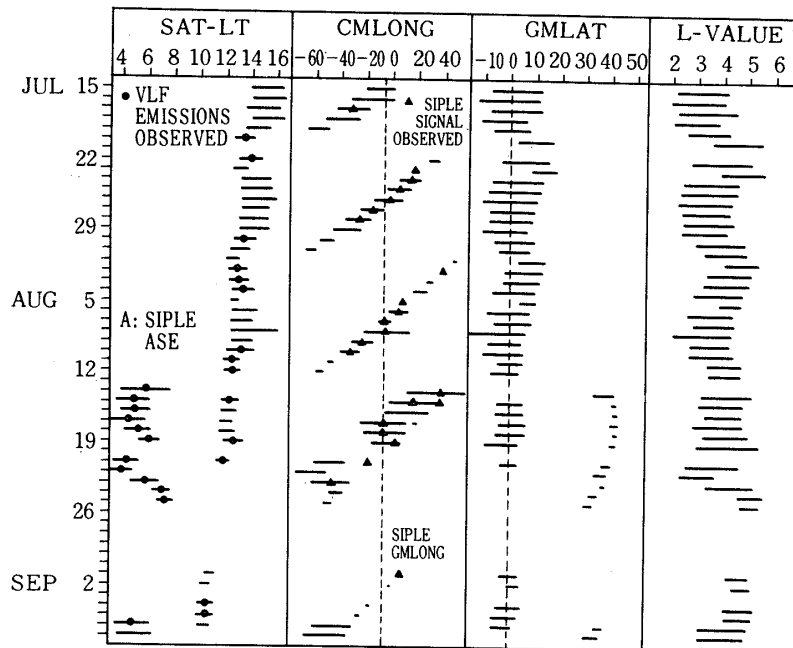
・6318" (NPW-VとESP)

・2161" (ESPは連続でNPW-VとIEF-Iの時分割)

の2種類で、前者はH-bit rate、後者はL-bit rateである。

#### 4. 観測結果の概略

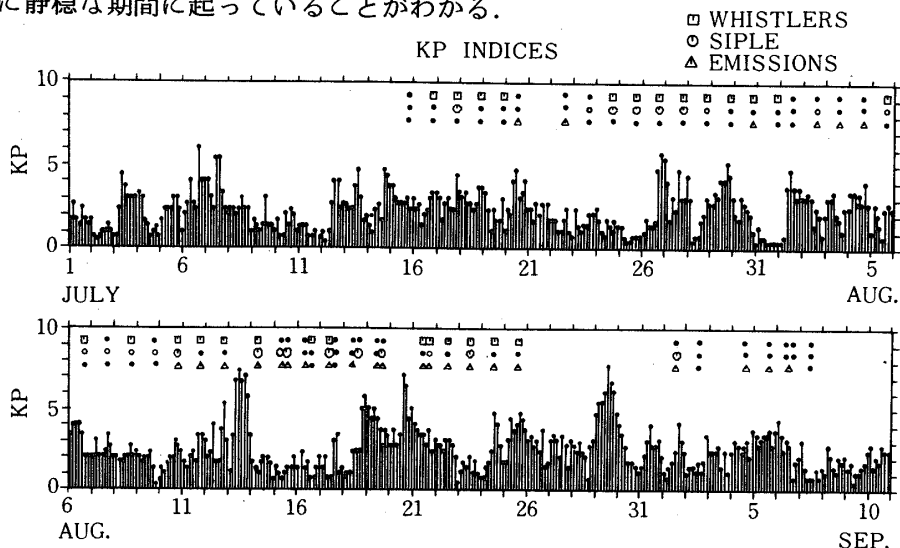
第2図に夏期間の観測全軌道のサマリーを示す。すなわち、観測した軌道は7月15日~8月12日までの期間では赤道面交叉の軌道であるが、ローカル時はいずれも午後となっている。この間ASEは全くみつけれなかったもので、8月14日以後はローカル時は午後で赤道面交



第2図 夏期間実験の軌道, 観測結果のサマリー表

又の通路の外に高緯度 (磁気緯度 35~45°N) であるが早朝の軌道をも選んだ. その結果8月14日 (HL), 15日 (E), 17日 (HL), 18日 (HL), 18日 (E) と5つのASEが存在すると思われる軌道が発見された. ここで (E) は赤道面付近, (HL) は高緯度における受信を表わす.

又, これらのイベントと地磁気活動度の指標であるKpインデックスとの比較を行ったのが第3図であるが, これから明らかに上記の5例はいずれも8月13日の大きな磁気嵐直後の非常に静穏な期間に起っていることがわかる.



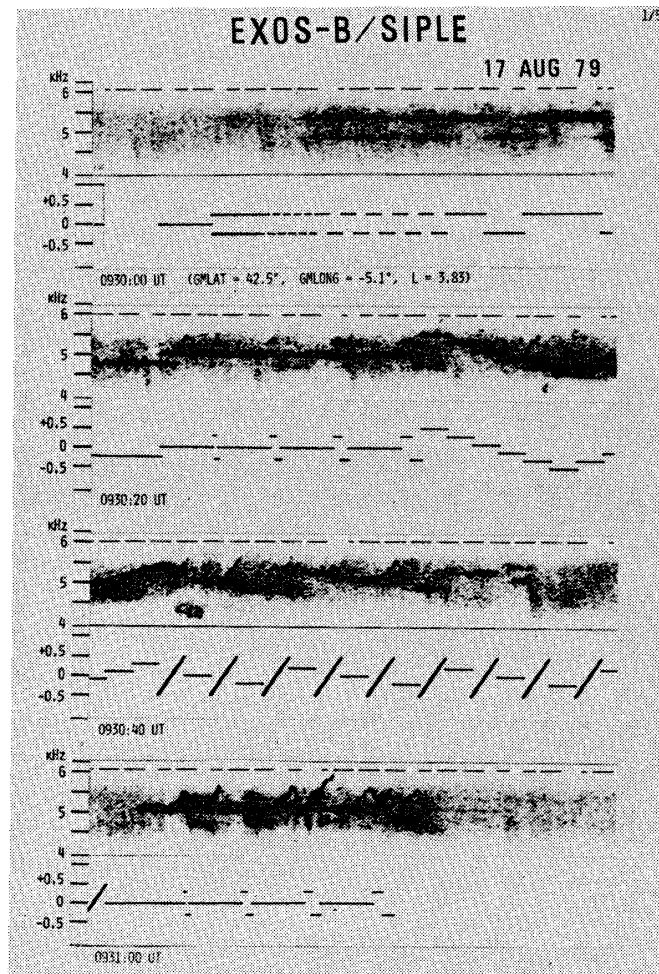
第3図 じきけん衛星で観測されたVLF波動のアクティビティと地磁気Kpインデックスの関連, "A" はASEのあったことを示す

### 5. サイプル ASE イベント

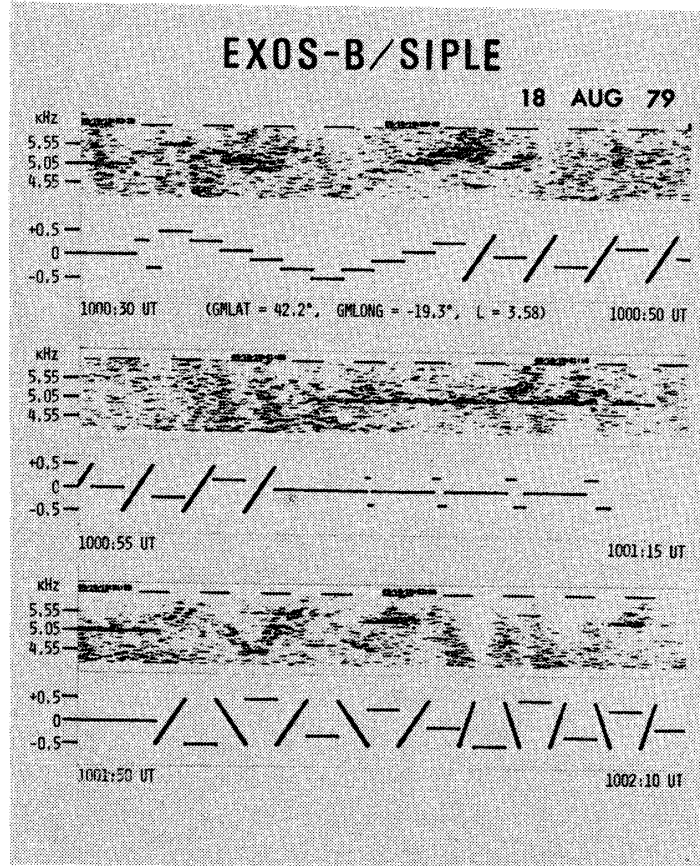
前項で述べたように、サイプル信号に関連すると思われる ASE は 5 軌道においてみつけられているが、それらは赤道付近で 2 例、高緯度が 3 例となる。これらを更に詳細にみると、まず第 4 図は 8 月 17 日に高緯度 ( $\sim 43^\circ \text{N}$ ) で受信された最も典型的な ASE であり、riser や falling tone, broadening 等の種々の放射スペクトルがみられ、それらは送信信号とよく対応している。すなわち、伝搬の遅延時間 (この場合約 2 秒) を補正すると各エミッションの原因となる送信波が必らず存在している。

次に、8 月 18 日午前 (HL) 及び午前 (E) の軌道では SN 比は可成り悪いが、やはり上と同様な送信波と対応して ASE がみられる。第 5 図は 18 日午前の例を示す。

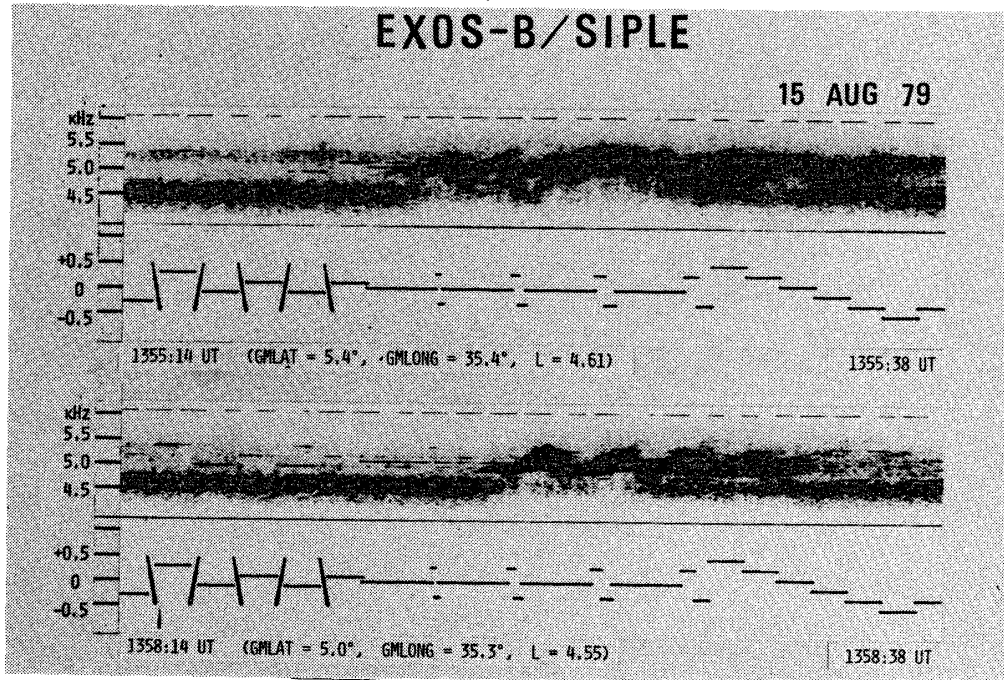
一方、第 6 図 (8 月 15 日 (E)) 及び 7 図 (8 月 14 日 (HL)) に示す例では、エミッションに直接対応する送信々号が見当らず、前に送信された信号が何回かのエコー伝搬をしたものが源となったと考えられるものである。特に第 7 図では励起されたエミッションが又エコーすることにより、一定周波数の長い放射を作り、それからノイズバーストを更にトリガーしたと考えられる。



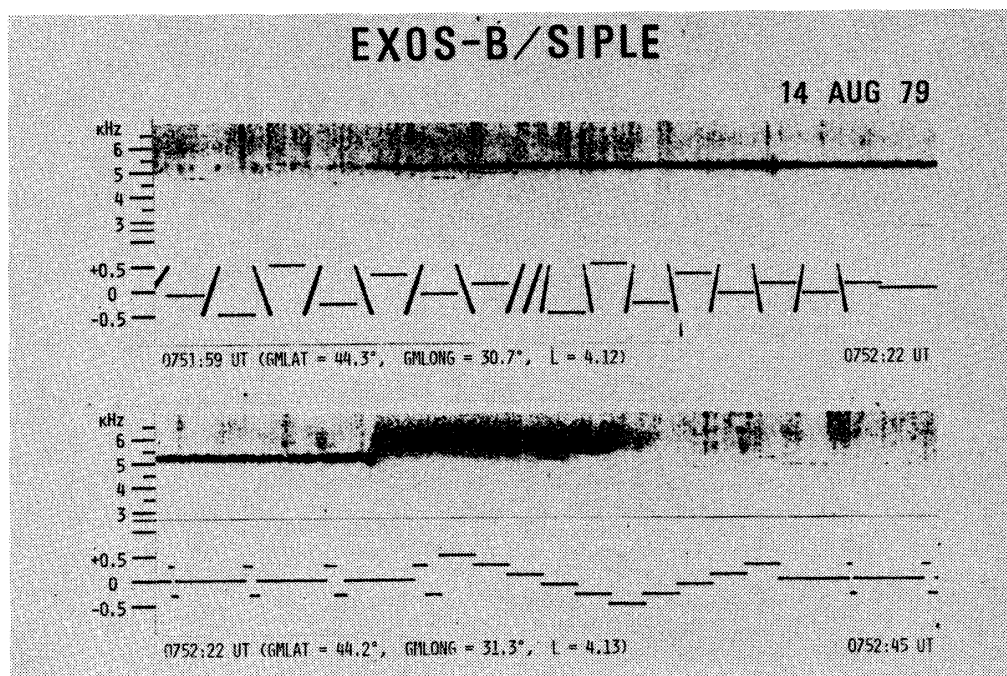
第 4 図 8 月 17 日 0930 UT の観測例



第5図 8月18日 1000:30 UTの観測例



第6図 8月15日 1355:14 UTの観測例



第7図 8月14日 0751:59 UTの観測例

### 6. VLF現象と粒子スペクトルの関連

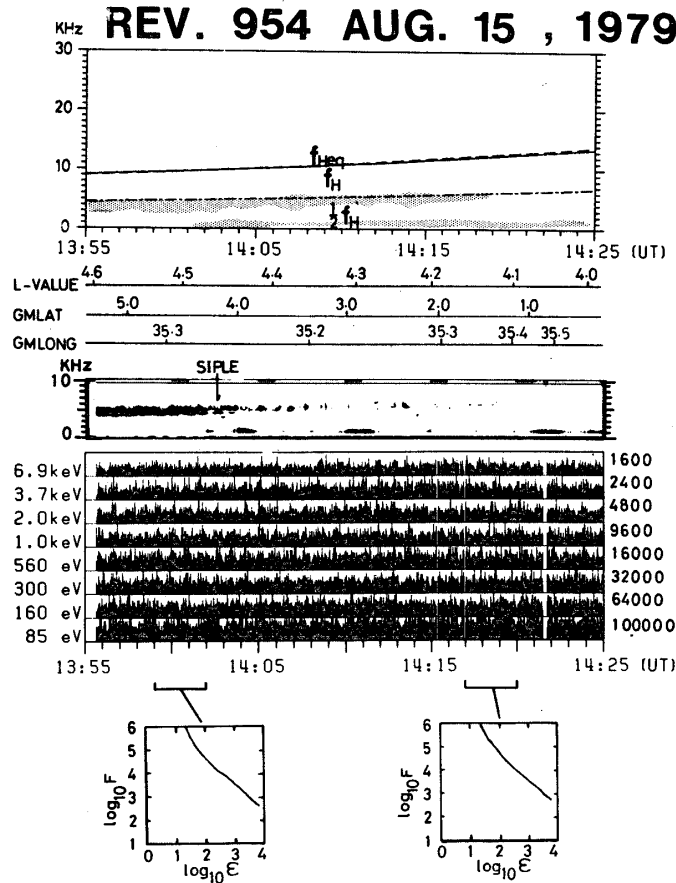
粒子データの解析については、各エネルギーチャンネル毎のフラックスと、或時刻近辺の平均の分布関数、ピッチ角分布が計算され、VLFスペクトルと並べて表示される。ピッチ角分布を求めるには衛星の姿勢が必要であるが、地磁気姿勢計が使えないので、粒子フラックスの変化特性そのものを使って姿勢とピッチ角分布が共に求められた[3]。

第8図には8月15日のVLF波動のスペクトルと並べて、電子のフラックスを代表的な8つのチャンネルについて示している。又、一番下には2つの時刻における3分間平均の分布関数を示している。この図でFはフラックス(単位は $\text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1} \text{str. eV}$ )、 $\epsilon$ はエネルギー(eV)である。又最上段にはスペクトルの模写と共にローカルのサイクロトン周波数 $f_H$ 、同じL-Shell上の赤道面の $f_H$ 、すなわち $f_{Heq}$ 、及び $\frac{1}{2}f_H$ が示されている。又第9図左側には前図の分布関数の示された時間に対応するピッチ角分布を各エネルギーチャンネル毎に示した。

これらの図から次のことがわかる。

i) サイクル信号によるASEはその信号周波数が赤道の $f_{Heq}$  (この場合はローカルな $f_H$ と一致)の半分に近いときに起っている。

ii) 電子のフラックスはどのチャンネルにも多いが、特にASEの見られる13:59 UT頃のピッチ角分布は、0.5~1 KeV付近で強い異方性が見られ、ASEの見られない14:17



第 8 図 8 月 15 日赤道通過軌道の VLF スペクトルと電子フラックス，分布関数の関係， $f_H$ ， $f_{Heq}$ ：ローカル及び赤道上サイクロトン周波数

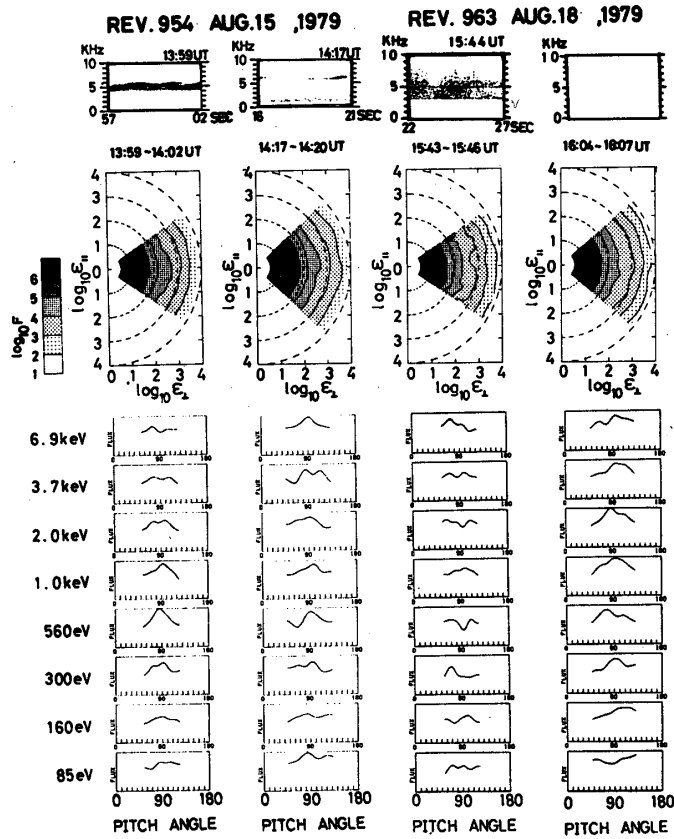
UT頃にはピッチ角異方性はあまり見られない。

第 10 図は電子のサイクロトン共鳴する電波の周波数とエネルギーを示したものであるが、上記の例では  $f_H \approx 12$  KHz， $f/f_H = 0.5$  であり、ホイスターの観測等から観測点はプラズマポーズの内側でプラズマ周波数  $f_H \approx 120$  KHz と考えられるので、0.5～1 KeV 付近に共鳴エネルギーが来ることになる。従って第 10 図の観測のピッチ角分布を考慮すると、この日の ASE は電子のピッチ角異方性によるサイクロトン不安定を発生機構と考えることができる。

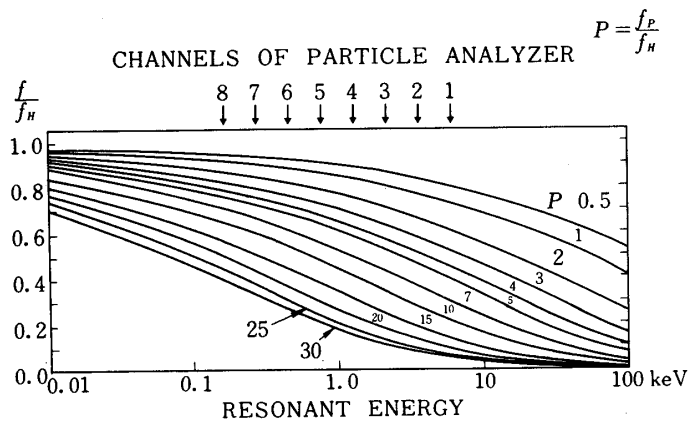
第 11 図には 8 月 17 日の VLF，電子フラックスのデータを示す。一般にこの例のように高緯度（ $\sim 43^\circ$ ）付近の軌道は赤道通過のそれに比して粒子のフラックスがかなり小さくなるのが特長であり、ピッチ角分布もよい精度では求められない。この図から次のことがわかる。

i) この日の観測は 0920 UT に開始され、中心周波数 3.96 KHz のサイプル信号が弱く受

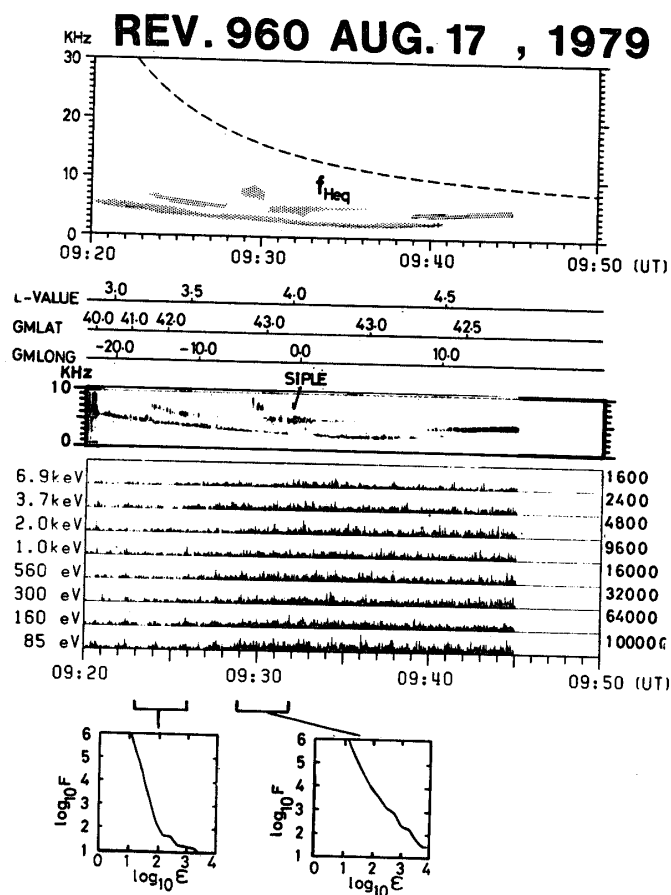




第9図 ピッチ角分布 (8月15日及び8月18日の例)



第10図 電子サイクロトン共鳴条件を満たす電波の周波数共鳴エネルギーの関係  $f_b$ : プラズマ周波数



第11図 8月17日のVLFスペクトルと電子フラックス

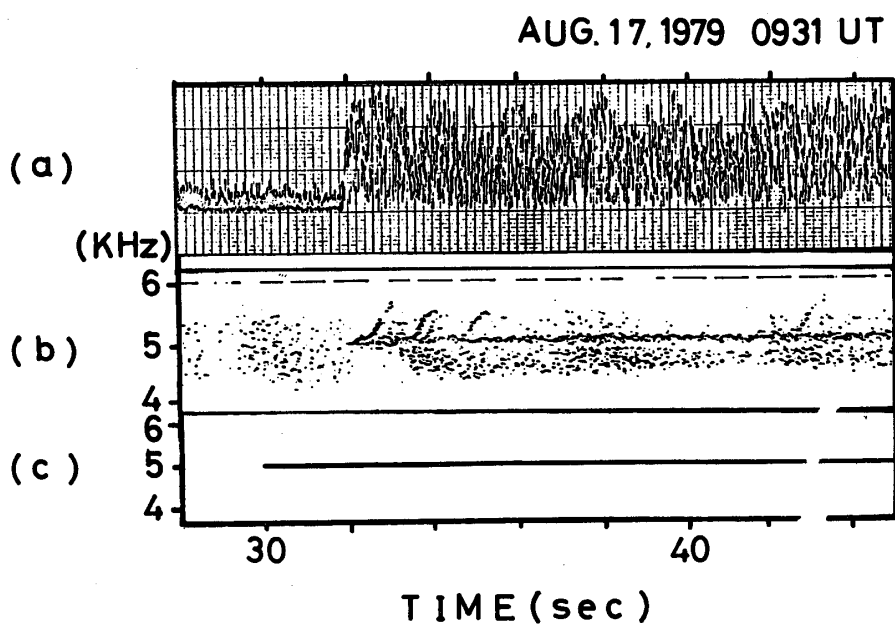
信された。0930 UTからサイプル周波数が5.05 KHzにシフトされ、自然の比較的強いエミッションバンドの中にはいったが、この瞬間から強いASEが発生した。

ii) 粒子は観測初期から非常に少ないが、0928 UT頃より増加し始めておりASEの発生時期とほぼ一致している。

### 7. サイプル信号の伝搬時間

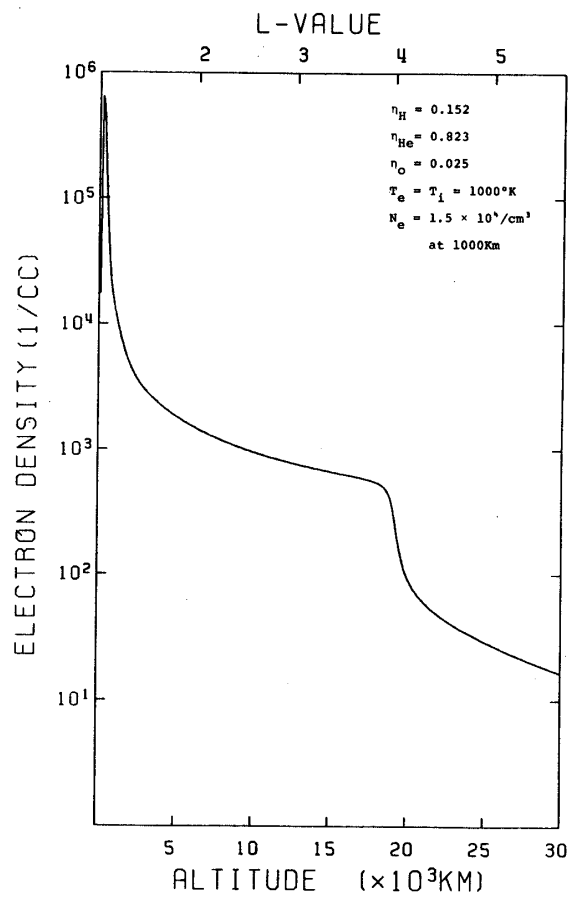
サイプル信号が受信された場合、その送信パターンとの比較により伝搬時間が測定できる。例えば8月17日の典型的なASEの場合、第12図に示す様に(c)は送信々号のキーダウンを示し、(b)は衛星受信のスペクトル、(a)は送信周波数5.05 KHzでみた信号強度のペン書き記録である。このデータからこの場合の伝搬時間は2.0秒であることがわかる。衛星の位置は磁気緯度43°Nである。

この場合の伝搬通路を推定するために、第13図に示す様な拡散平衡型の電子密度分布を仮定する。まずL=4を通るダクト伝搬を考え、43°Nの衛星までの伝搬時間を計算するとこれが2.0 secとなる。又ノンダクト伝搬の場合、55°S、60°S、65°Sから地上300 Km

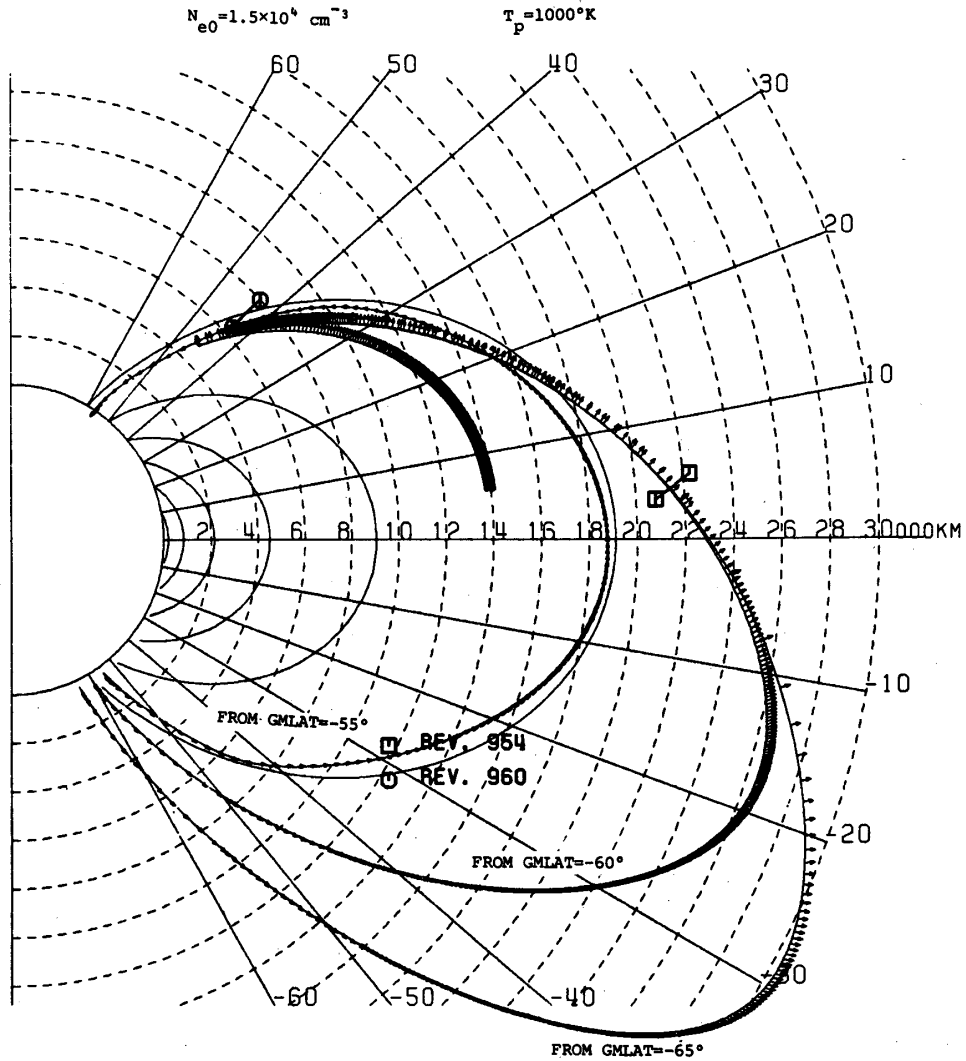


第12図 サイプル信号の伝搬時間（8月17日の軌道の例）  
 (a) 周波数 5.05 KHz における信号強度の時間変化  
 (b) 受信 VLF スペクトル  
 (c) 送信周波数パターン

で垂直に出発した ray tracing を行うと第14図に示す様にいずれも  $43^{\circ}$  N に到達するが、伝搬時間はそれぞれ 2.0, 6.0, 36 秒となり、 $55^{\circ}$  S から出た場合の通路が条件を満足し、これが又ダクト伝搬とほぼ同様の通路となることがわかる。すなわち 8月17日の例では磁力線に近い伝搬をしたものと考えられる。



第 13 図 伝搬時間の計算に用いた拡散平衡形の電子密度分布



第14図 伝搬通路の計算結果

### 8. 検討と結論

以上昨年行ったじきけんによる実験結果から、サイプル信号によるASEのスペクトル、電子フラックスとの関係を先ず述べた。赤道面付近で観測された8月15日の例では、1 KeV程度の電子ピッチ角異方性によるサイクロトロン不安定をASE発生メカニズムと考えることができた。8月17日の高緯度の観測例ではローカルな電子フラックスは小さいが、もし相互作用領域が赤道面付近と仮定し、そこでのフラックスが十分であればサイクロトロン不安定の機構と矛盾しないかもしれないが、明瞭な結論は出せない。冬期の実験では軌道が南半球(8°~20°S)にあったことがASEがなかった原因であれば大変面白いが、この結論

を出すにはデータ不足である。

ASEの観測されたのは8月14日～18日の間に限られていたことは大変興味深い、特にこの期間が8月13日の大きな磁気嵐の直後の大変静穏な期間であったことは、地上ロバール局においてサイプル信号が $\Sigma Kp$ 最低の日に最も高い確率で検出されるという結論[5]と何らかの関連があるように思われる。

なお、信号の振幅の情報は大変貴重なものであるが、先に述べたじきけん衛星搭載受信機の特性から判断すると、この衛星で受信された信号電界強度は最大 $2.8 \mu V/m$ 程度となり、屈折率を40と仮定しても $0.37 \text{ pT} (= m r)$ となり今まで理論で仮定していた値( $\sim 1 m r$ )と比べ可成小さいがIMP-6で観測されたものよりは大きい[6]。この点は更に検討を要する。

#### 謝 辞

本実験は東大宇宙航空研究所の特別事業の一部であるが、米国における観測は文部省科学研究海外学術調査研究費及びNASAの支援によって行われた。特にNASA本部のシュマリング博士に負う処が大きい。じきけん衛星の運用については東大宇宙研大林教授、河島助教授、東北大家教授はじめ多数のプロジェクトメンバーの方々のご支援によって行われた。ここに関係各位に厚く謝意を表する。

1980年10月20日 新設部(科学)

#### 参考文献

- [1] 木村, 松本, 橋本, 向井, T.F. Bell; 宇宙観測シンポジウム報告集, 昭和54年度, pp. 221-225
- [2] 木村, 松本, 橋本, 向井, T.F. Bell, U.S. Inan, J.R. Katsufraakis, R.A. Halliwell; 惑星プラズマ圏および磁気圏研究会報告集, 第一部, 昭和54年10月, pp. 1-25.
- [3] 木村; 磁気圏シンポジウム報告集, 昭和54年12月, pp. 67-75.
- [4] 久保, 向井, 河島; 宇宙研報告, 1979年10月, pp. 751-765.
- [5] D.L.Carpenter and T.R. Miller; J.Geophys. Res. **81**, pp. 2692-2700 (1976).
- [6] U.S. Inan, T.F. Bell, and D.L. Carpenter; J. Geophys. Res. **82**, pp. 1177-1187 (1977).