

科学衛星 EXOS-C (OHZORA) PPS による  
トップサイドサウンディング\*

小原 隆博\*\*・大家 寛\*\*・森岡 昭\*\*

(1985年1月7日受理)

Topside Sounding Experiment Carried out with PPS on board  
the EXOS-C (OHZORA) Satellite

By

T. OBARA, H. OYA and A. MORIOKA

**Abstract:** The topside sounding experiment (PPS) on board the EXOS-C (OHZORA) satellite has been successfully carried out in the ionosphere for the observation of plasma structure and its variation as well as the plasma wave phenomena due to the plasma turbulence associated with the precipitating particles. The satellite has the initial apogee and perigee of 865 km and 353 km, respectively, with the inclination of 74.6°.

The PPS observations have presented following new data and evidences.

(1) Very intense electrostatic plasma waves as well as the whistler mode waves have been observed as a result of the particle precipitation into the ionosphere. At the same time the satellite observed the small scale irregularities in the high altitude, which suggests the plasma turbulence produced by the particle precipitation through the wave particle interaction process.

(2) The up-ward movement of the ionospheric plasma due to the local thermalization has been observed in the trough region, being associated with the particle precipitation. An aspect that the particle precipitation injects energy into the polar ionosphere has also been confirmed.

(3) Latitudinal dependency of the scale height above the  $F_2$  peak

---

\* 宇宙研特別事業費による研究論文

\*\* 東北大学理学部

altitude has been detected by analyzing the vertical profile of the electron density deduced from the echo data. The temperature deduced from the scale height indicated the evidence of the heat input into the low latitude ionosphere across the magnetic field.

(4) The leaked auroral kilometric radiation has been successfully observed in the polar ionosphere. These observation data strongly support the conversion theory of the generation process of auroral kilometric radio waves. It is also newly discovered that the leaked AKR waves show a very fast variation in their intensity.

## 概 要

科学衛星 EXOS-C (おおぞら) に搭載された惑星プラズマサウンダー (PPS) における SPW モードで、トップサイドサウンディング実験が行われた。その結果、電離層プラズマの立体的計測がなされたと共に、従来十分に究明されていないプラズマの擾乱現象、更に粒子流入によるエネルギー注入に関し、新たな事実が得られた。

## 1. 序

科学衛星 EXOS-C (OHZORA) に搭載されたプラズマサウンダー (PPS) は SPW (波動励起) モードでプラズマ中に、300 ワットのパワーを持つ振動電界を 65 フィートアンテナを介して印加し、プラズマ中に生ずる種々のプラズマ波動現象を観測する。又、同時にアンテナから放射された電波が電離層により反射され、再び衛星に戻ってくる事を利用したトップサイドサウンダーとしての機能も合わせもつ。

この様な能動的手法を用いたプラズマ波動観測は Alouette, ISIS, ISS, EXOS-B 等で実現されており [1], [2], EXOS-C (OHZORA) による観測法も本質的に変わらないが、その目的、実現方法で独自性と新たな必要性を持っている。即ち、サウンダー観測の主目的は降下粒子とプラズマ大気の相互作用の解明にあり、降下粒子のデータ及び発生する自然プラズマ波動の観測と共にプラズマ中のエネルギー解放過程を明らかにしていく。降下粒子とプラズマ大気が激しく相互作用を起こす領域は、極域とブラジルアノマリー域で、これらの領域で生ずるスプレッド F の詳細な観測が重要な観測課題となる。

1984 年 2 月 14 日の軌道投入後、5 月 16 日のアンテナ全伸展を経て、PPS によるサウンディングが本格的に実施された。本稿では 1984 年 9 月までに得られた観測データを基に新たに解明されつつある種々の事実について述べる。

## 2. 観測機器

PPS システム (第 1 図) のうち SPW モード観測は、(i) 信号発生部、(ii) 電力増幅部、(iii) アンテナ及びアンテナスイッチ部、(iv) 受信部、及び (v) データ処理部より成り、各サブシステムの動作は DPU (Data Processing Unit) により集中的に制御される。

2-1 信号発生部

高周波パルスの送信周波数は、PLLにより発生される。従って非常に高精度の局発信号が得られ、周波数を一定に保った状態での送信受信が行なわれることになる。信号発生部で作られる周波数を表1にしめす。

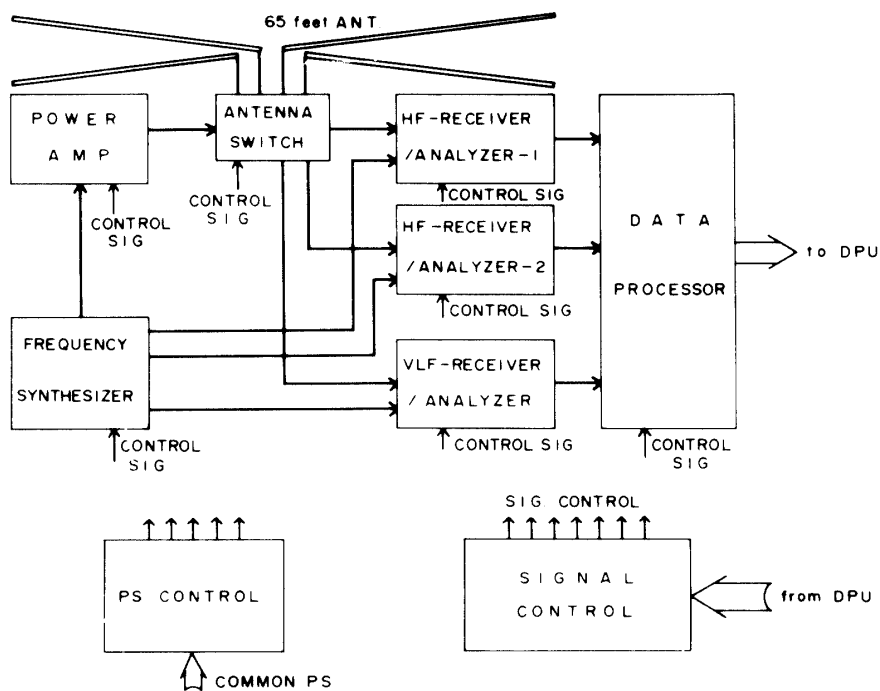
2-2 送信部

2-2-1 電力増幅部

第2図に送信部のブロック図をしめす。信号発生部で作られたRF送信信号は、パワー

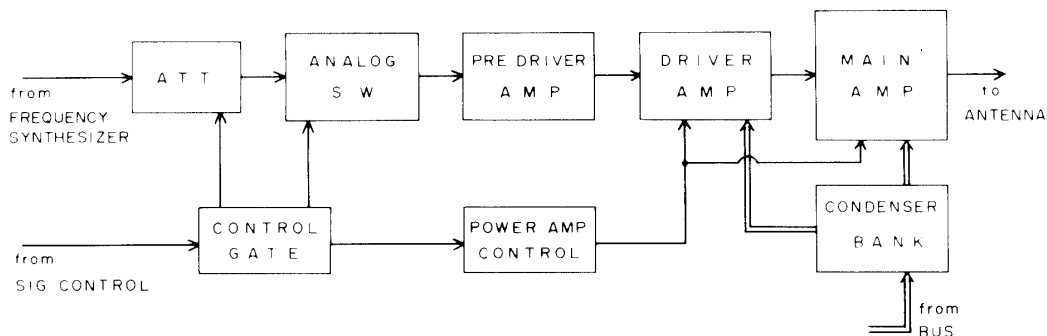
表1 PLL発振周波数

Local-Sig.	Swept Frequency	BAND 1	35.1-35.4 MHz
		BAND 2	35.4-36.6 MHz
		BAND 3	36.6-41.4 MHz
		BAND 4	41.4-51.0 MHz
Tx-Sig.	Swept Frequency	BAND 1	0.1-0.4 MHz
		BAND 2	0.4-1.6 MHz
		BAND 3	1.6-6.4 MHz
		BAND 4	6.4-16.0 MHz
	Fixed Frequency	FixS 1	547.5 KHz
		FixS 2	913.0 KHz
		FixS 3	1105.5 KHz
		FixS 4	1354.0 KHz

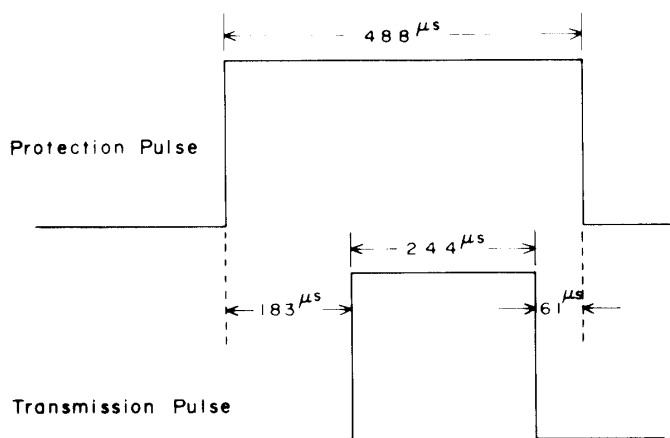


第1図 PPSシステム構成図

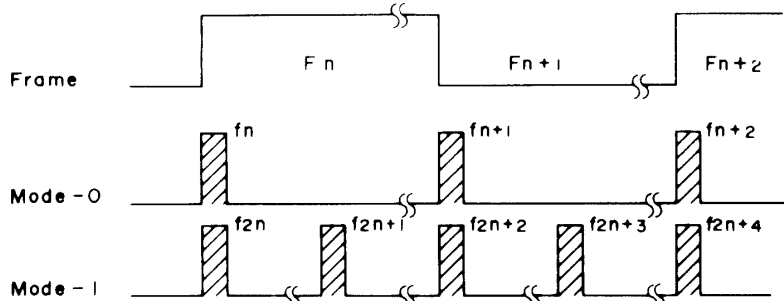
アンプにより大電力 (High power : 300 W, Low power : 60 W) のパルス信号へと増幅され、アンテナに印加される。電力増幅部では、瞬時に流れる電流が約 60 A に達するため、衛星のバスラインからの直接給電は行わず、11 000  $\mu\text{F}$  のコンデンサーバンクに電力を蓄えてから給電する。この方法によりパワーアンプの動作に起因する電流リップルは極めて小さい量に抑えられている。送信用ダイポールに印加される RF 送信信号は、パルス変調



第2図 送信部ブロックダイヤグラム



(a)



(b)

第3図 パルス発射のタイミング(a)とフレーム関係(b)

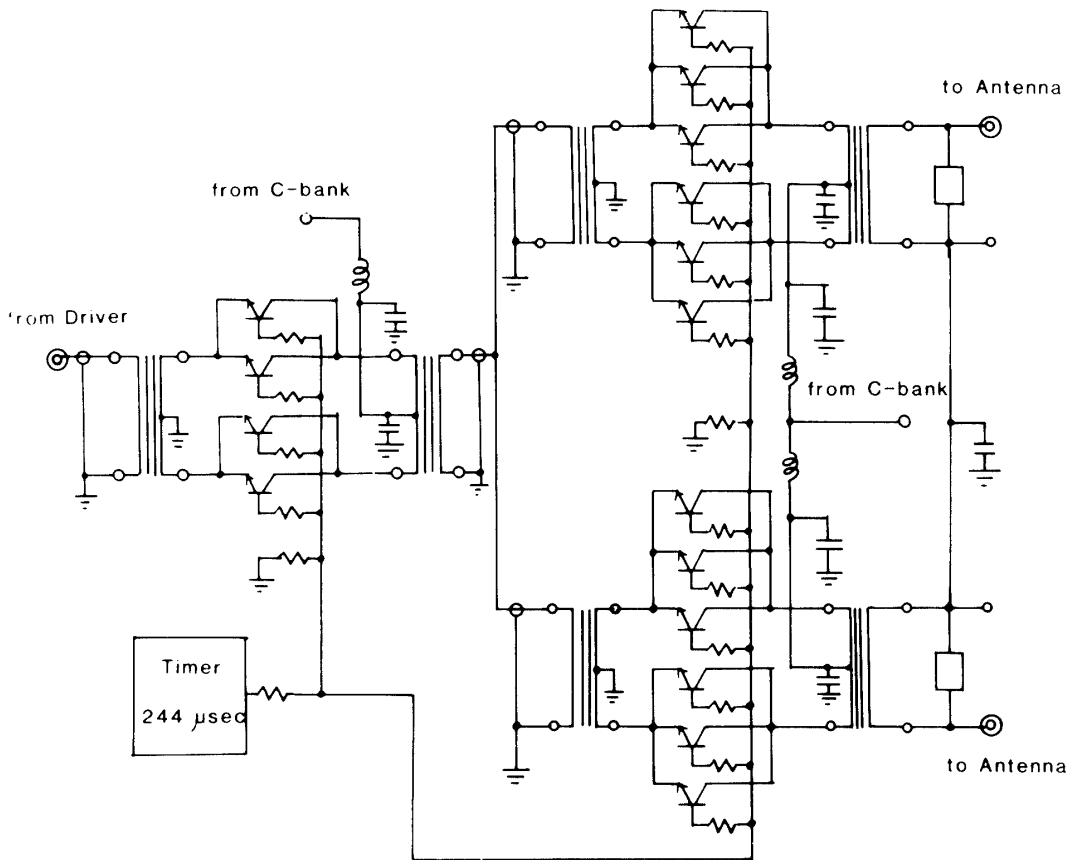
がかけられるが、その方式は以下の通りで、特に第3図に送信パルスとフレームの関係をしめす、すなわち、

- (i) パルス周期 (2種)
  - モード0…1パルス/フレーム
  - モード1…2パルス/フレーム
- (ii) パルス幅 244  $\mu\text{sec}$ .
- (iii) 保護パルス幅 488  $\mu\text{sec}$ .

電力増幅段は Pre-driver 部, Driver 部, 及び Main 部の3部から構成され, 大電力パルス信号増幅が行なわれる. 特に Main 部は, 第4図にしめす様にベース接地の回路をもつパワートランジスタの並列運転が行なわれるよう構成されている. この事により, 飽和電流値の増大と高周波での十分な送信電力が得られることになる.

### 2-2-2 送信周波数

第1表にしめす様に, 送信周波数は周波数掃引モードと, 固定周波数モードの2つを持ち, OG 及びブロックコマンドの2種のコマンドにより, 所定の周波数が選ばれる. 周波数掃引モードは受信周波数と同じ, 100 kHz から 16 MHz の帯域を 448 ステップで掃引する. 固定周波数モードは固定4周波がサイクリックに繰り返し送信される.



第4図 PPS パワーアンプ電力増幅部の回路図

### 2-3 受信部

大電力高周波パルスを印加した結果、励起されるプラズマ波動及びエコー電波は、自然プラズマ波動と共に直交するダイポールアンテナにより受信される。プラズマ波動の受信はダブルスーパーヘテロダイン方式を用いた掃引型周波数分析器となっている。ここで、第1局部発振周波数は、信号発生部で送信周波数を合成する時、同時に発生される。これらの送信周波数及び第1局部発振周波数は、100 kHz から 16 MHz 及び 35.1 MHz から 51.0 MHz までそれぞれ 448 ステップで掃引される。受信信号は、第1局部発振周波数と混合の後、中心周波数 35 MHz の第1中間周波数において増幅されるがこの第1中間周波数では、帯域幅 10 KHz の水晶フィルターによりシャープな選択特性が実現されている。さらに信号は中心周波数 455 KHz の、第2中間周波数で増幅された後検波される。

サウンダーモードの受信は送信周波数に同調した受信及びデータ処理が本質となるが、特に送信パルスのエコーを受信するため固有のタイミング関係が存在する。

#### (i) 掃引速度

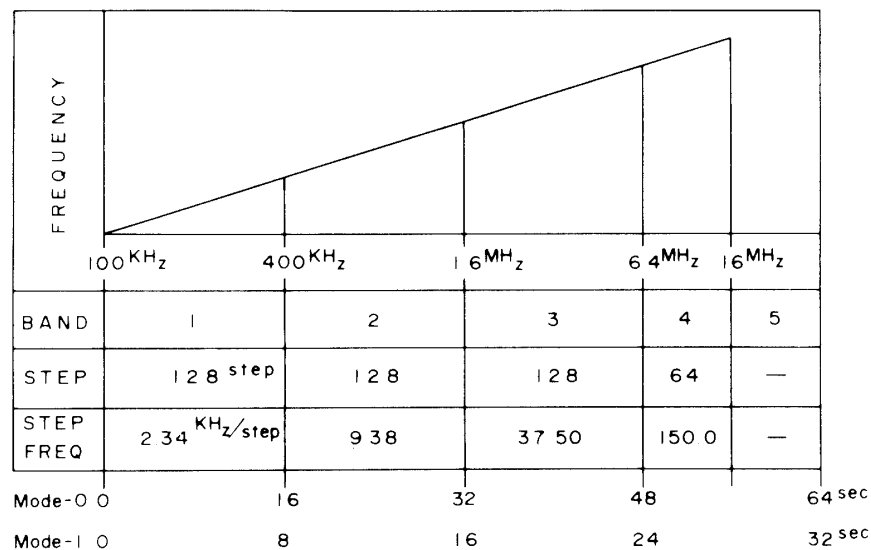
2-2-1 で述べた様に、送信パルスの周期は1フレームに1パルス(モード0)及び2パルス(モード1)がありそれぞれに対応し、64秒及び32秒を要して全周波数バンドが掃引される。(第5図参照。)

#### (ii) Fine モード

電離圏における電子サイクロトロン周波数近傍のレゾナンスを高い周波数分解能をもって詳細に観測するため、Fine モードが設定されている。このモードによる観測の時は BAND 2 (400 KHz~1.6 MHz)が512ステップで掃引され受信帯域幅は、2 KHz となる。

### 2-4 データ処理部

アナログ出力信号は、最終的に検波回路を経て A/D コンバータに送られる。サウンダーモード(モード0及びモード1)では、受信部の検波出力はピークホールド回路に入り、



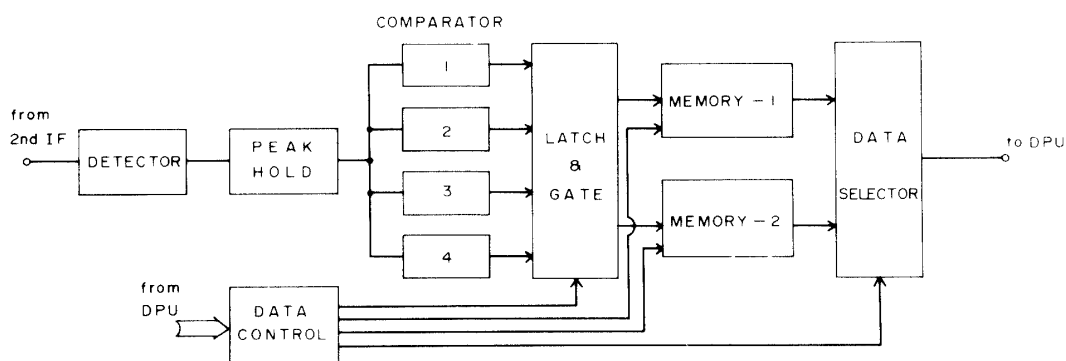
第5図 サウンダー送信周波数

その出力は4段階の対数的に配分された基準レベルを持つレベルコンパレータにより判別され出力される。従って、サウンダーデータは2ビット分解能になる。第6図にデータ処理ブロック図をしめす。第7図に入力に対する検波出力値及びコンパレータのレベルをしめす。

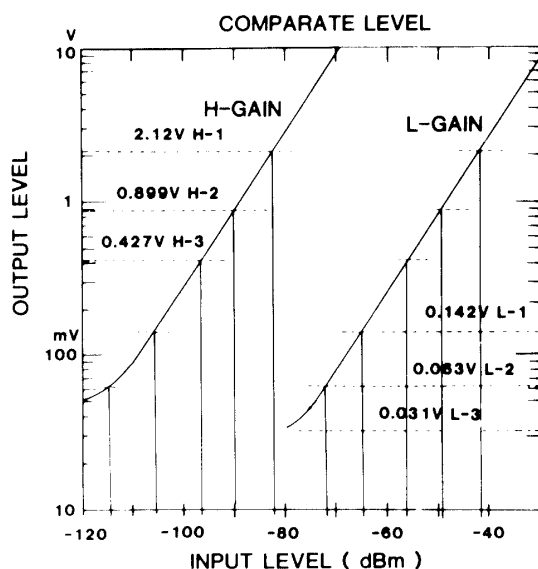
PPSにおいてパルス送信後、そのエコー電波の観測のために、受信は十分な時間分解能をもって行なう必要がある。このため1パルス送信後、受信データは120回サンプルが行なわれる。サンプルのタイミングは観測の目的に応じて3つのタイプ(タイプI:975  $\mu\text{sec}$  毎, タイプII:244.15  $\mu\text{sec}$  毎, タイプIII:61.04  $\mu\text{sec}$  毎)が、選択出来る。

### 2-5 コマンド制御

EXOS-C (OHZORA) 衛星では、DPUにより自動管制をおこない多様な観測を種々な



第6図 PPS データ処理部



第7図 受信機総合入力出力特性及びデータ処理部コンパレータレベル。コンパレータレベルはコマンドによりHレベルとLレベルの2つの切替えが可能になっている。

運用条件で実施することが可能になっている。この制御を行なうのは OG (Organized Command) であるが、この OG は 1 観測単位 (128 秒を基本単位として最大 2048 秒まで任意の運用時間が選択出来る) を最小単位として共通機器及び観測機器にあらかじめプログラムされたコマンドとタイミングパルスを供給する。任意の 31 項目から成る OG シーケンスを作り実行させることにより、一連の制御シーケンスで最大 17 時間 38 分 8 秒の時間にわたり衛星を自動的に運用させる事が出来る。PPS の ON/OFF はもとより観測モードの選択及び多くの観測パラメータの制御も 16 ビットの OG により行われている。16 ビットの OG は 4 bit ずつ 4 グループに分けられ共通系の制御を上部 3 グループで行い、下位 1 グループ (4 ビット) が観測機器群の制御に当てられている。第 2 表及び第 3 表に、サウンダーモード (モード 0 及びモード 1) の下位 4 ビットの OG 内容をしめす。

PPS 観測のパラメータ設定は、複合リアルタイムコマンド (ブロックコマンドと呼ばれている) により行なう事も可能になっている。即ちブロックコマンドはパワーアンプ制御 (Power Amp Write) 観測モード制御 (Mode Write) 及び、受信系及びアンテナ制御 (IF Control Write) の 3 種から成っている。

#### (1) Power Amp Write コマンド

これは、サウンダーモードのパワーアンプ及びデータ処理方式を制御するもので、第 4 表に各ビットの内容をしめす。すなわち、

- (i)  $B_0$ : パワーアンプの出力選択 H/L (300 W/60 W)
- (ii)  $B_{1,2,3,4}$ : パワーアンプの保護抵抗 (R 1~R 4) の選択及びコンデンサーバンク (CB 1~CB 4) の ON/OFF
- (iii)  $B_{5,6}$ : サウンダーデータサンプル方式の選択 (I, II, III)
- (iv)  $B_7$ : サウンダー周波数バンドの選択 (Norm/Fine), となっている。

#### (2) Mode Write コマンド

観測モードと各モードにおける送信信号をきめるコマンド群で、第 5 表に各ビットの内容をしめす。即ち、

- (i)  $B_0 \sim B_3$ : 観測モードの選択
- (ii)  $B_4 \sim B_7$ : 送信信号の選択, 特に  $B_4$  は信号の範囲 (BAND 1~4) を, Cyclic に切替える CY と, 信号の範囲のひとつに Select する SEL の選択に対応している。又,  $B_5$  は Sweep Signal, SWSIG と, Fixed Signal, FIXSIG の選択をし,  $B_6$  と  $B_7$  の組合せで出来る 1~4 の数は, 信号範囲を選択する BAND 1~4 に対応している。

#### (3) IF Control Write コマンド

受信機の利得及びアンテナ選択をコントロールするコマンド群で、第 6 表に各ビットの内容をしめす。すなわち

- (i)  $B_0 \sim B_3$ : 受信機の Gain Control (BGA-H/L) の選択, サウンダー出力 Compare level 切替 (SGA-H/L) 及び, VLF の Gain Control (VGA-H/L) を  $B_0 \sim B_3$  の組合せで行なう。
- (ii)  $B_5$ : アンテナの接続を固定する (FIX) モードと, タイムシーケンシャルにて切替



表2 PPS サウンダーモードOG内容(その1)

モード	W <sub>0</sub>	ESP	PPSモード						TX		HF		VLF		NEI		NPP	SPW	CAL	SWEEP RATE		
			SPW	NPW	NPW	NEI	NPP	Power	SIG SW/FIX	LOCAL SW/FIX	1GAIN	2GAIN	SAEEP FIN/NOR	BAND NR/WD	GAIN H/L	PPROBE SIG SW/FIX				GAIN H/L	PROBE LON/NOR	POL XY
	0	ALL PRESET	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	NOC	NOC	NOC	NOC	NOC	NOC	NOC	NOC	NOC	NOC	NOC	NOC	64/32	2	0.125/16
	1	A-A	ON	ON	ON	ON	ON	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	CAL	64			
	2	NOC	ON	ON	ON	ON	ON	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	MES				
	3	A-A PRESET	ON	ON	ON	ON	ON	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW					
	4	ALL	ON	ON	ON	ON	ON	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW					
M	5	A-A	ON	ON	ON	ON	ON	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW					
0	6	ALL	ON	ON	ON	ON	ON	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW					
D	7	A-A	ON	ON	ON	ON	ON	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW					
E	8	ALL	ON	ON	ON	ON	ON	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW					
0	9	A-A	ON	ON	ON	ON	ON	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW					
	A	ALL	ON	ON	ON	ON	ON	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW					
	B	B-B	ON	ON	ON	ON	ON	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW					
	C	A-C	ON	ON	ON	ON	ON	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW					
	D	A-C SCAN	ON	ON	ON	ON	ON	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW					
	E	C-A PRESET	ON	ON	ON	ON	ON	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW					
	F	D-A	ON	ON	ON	ON	ON	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW	FRSW					

表3 PPSカウンタモードOG内容(その2)

モード W <sub>10</sub> B <sub>4</sub> - B <sub>1</sub>	ESP	TX						HF				VLF		NEI		NPP		CAL		SWEEP RATE	
		SPW H/V	NPW H/V	NEI OFF	NPP OFF	Power H/L	SIG SW/FIX	LOCAL SW/FIX	1GAIN H/L	2GAIN H/L	SAEEP FIN/NOR	BAND NR/WD	GAIN H/L	PROBE SIG SW/FLX	PROBE LONG/ NOR	POL XY	SAMPLE II/III	MES I/II/III	SPW 61/32	NPW-H 2	NPW-V 0.125/16
0	ALL PRESET	OFF	OFF	OFF	OFF	NOC	NOC	NOC	NOC	NOC	NOC	NOC	NOC	NOC	-	-	NOC	NOC	NOC	-	-
1	A-A	ON	*	*	*	OFF	ERSW	ERSW	*	NOR	-	-	-	-	-	*	CAL	32	-	-	
2	NOC	*	*	*	*	NOC	*	*	*	NOC	-	-	-	-	-	*	MES	*	-	-	
3	A-A PRESET	*	*	*	*	*	*	*	*	FIN	-	-	-	-	-	*	*	*	-	-	
4	ALL	*	*	*	*	*	ERSW	ERSW	ERSW	NOR	-	-	-	-	-	*	*	*	-	-	
5	A-A	*	*	*	*	*	*	*	*	NOC	-	-	-	-	-	*	*	*	-	-	
6	ALL	*	*	*	*	*	SECY	SECY	NOC	-	-	-	-	-	-	*	*	*	-	-	
7	A-A	*	*	*	*	*	*	*	*	*	-	-	-	-	-	*	*	*	-	-	
8	ALL	*	*	*	*	*	ERSW	ERSW	ERSW	-	-	-	-	-	-	*	*	*	-	-	
9	A-A	*	*	*	*	*	*	*	*	*	-	-	-	-	-	*	*	*	-	-	
A	ALL	*	*	*	*	*	*	*	NOC	-	-	-	-	-	-	II	*	*	-	-	
B	B-B	*	*	*	*	*	*	*	*	*	-	-	-	-	-	III	*	*	-	-	
C	A-C	*	*	*	*	*	*	*	ERSW	ERSW	-	-	-	-	-	II	*	*	-	-	
D	A-C SCAN	*	*	*	*	*	*	*	NOC	-	-	-	-	-	-	III	*	*	-	-	
E	C-A PRESET	*	*	*	*	*	*	*	SECY	SECY	-	-	-	-	-	-	NOC	*	*	-	-
F	D-A	*	*	*	*	*	*	*	*	*	-	-	-	-	-	*	*	*	-	-	

表4 ブロックコマンド、パワーアンプライト B<sub>0</sub>~B<sub>7</sub>の対照表

	B <sub>0</sub>	B <sub>1</sub>		B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>	B <sub>5</sub>		B <sub>6</sub>	B <sub>7</sub>
0	60W	0	0	0	0	-	0	0	Sounder Sample II	Sounder NOR
1	300W	0	0	0	1	R <sub>1</sub>	0	1	I	FIN
		0	0	1	0	R <sub>2</sub>	1	0	III	
		0	0	1	1	R <sub>3</sub>	1	1	-	
		0	1	0	0	R <sub>4</sub>				
		0	1	0	1	CB (1.2.3.4.) ON				
		0	1	1	0	CB1 OFF				
		0	1	1	1	CB2 OFF				
		1	0	0	0	CB3 OFF				
		1	0	0	1	CB4 OFF				

表5 ブロックコマンド、モードライト B<sub>0</sub>~B<sub>7</sub>の対照表

	B <sub>0</sub>		B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>	B <sub>5</sub>	B <sub>6</sub>		B <sub>7</sub>
0	0	0	0	-	OFF	CY	SW SIG	0	0	1
1	0	0	1	SPW-S	ON	SEL	FIX SIG	0	1	2
	0	1	0	SPW-V				1	0	3
	0	1	1	NPW-H				1	1	4
	1	0	0	NPW-V						
	1	0	1	NEI						
	1	1	0	NPP						
	1	1	1	-						

える (ROT) モードを選択する。

(iii) B<sub>6</sub>, B<sub>7</sub>: VLF の BAND を Control する。

### 3. データ解析

EXOS-C (OHZORA) 衛星から伝送されるプラズマサウンダー観測データは、以下の3つのデータ処理の phase を経て処理される。

(i) 1次処理: Quick look 処理により機器の正常な動作を確認し, Delayed look 処理 (衛星の非可視時間での Quick 処理) により, 1周回データ毎の準サマリープロットの作成が行なわれる。

(ii) 2次処理: KSC より 9600 ボーの専用回線により, 宇宙研 (駒場) の M-180 (MSS) に取り込まれたデータに軌道データを付加したサマリープロットが作成される。

(iii) 3次処理: サマリープロットから見いだされる物理現象を更に詳細に解析するための最終段階であり, ユーザー側のシステムにより行なわれる。その主なものは, 軌道プ

表6 ブロックコマンドIF制御ライトB<sub>0</sub>~B<sub>7</sub>対照表

	B <sub>0</sub>		B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>	B <sub>5</sub>	B <sub>6</sub>	B <sub>7</sub>
0	0	0	0	-		NEI NOR	ANT FIX	NC	NC
1	0	0	0	1	NEI-H		LONG	ROT	VLF W D
	0	0	1	0	NEI-L				
	0	0	1	1	BGA-H				
	0	1	0	0	BGA-L				
	0	1	0	1	SGA-H				
	0	1	1	0	SGA-L				
	0	1	1	1	VGAH				
	1	0	0	0	VGAL				
	1	0	0	1	RGAH				
	1	0	1	0	RGAM				
	1	0	1	1	RGAN				
	1	1	0	0	RGAL				
	1	1	0	1	NPP POL				
	1	1	1	0	NPP XY				
	1	1	1	1	NPP PXY				

ロット、統計処理及び、Ionogram による N(h) プロファイルの作成などである。

観測された Ionogram から、Density profile を求める方法は、Jackson (1969) が提出した、Lamination (薄膜)法[3]に依っている。以下ではこの手法について簡単に記す。電波の Cut off 周波数  $f_0$  より若干高い周波数  $f_1$  で衛星から発射されたパルスが  $\Delta t_1$  後に再び衛星に戻ったとすると、見かけの伝播距離は

$$h'(f_1) = \frac{c\Delta t_1}{2} \quad (1)$$

と表わされる。遅延時間は  $h_0$  を衛星の高度、 $h_1$  を反射点の高度とすると、

$$\Delta t_1 = 2 \int_{h_1}^{h_0} \frac{dh}{V_g} \quad (2)$$

と表わされる。(1)と(2)から見かけ距離は

$$h'(f_1) = \int_{h_1}^{h_0} n' dh \quad (3)$$

と示され、ここで  $n'$  は群屈折率と呼ばれ

$$n' = \frac{c}{V_g} \quad (4)$$

で定義される。この群屈折率  $n'$  は、周波数  $f_1$  プラズマ周波数  $f_p$  の他に、サイクロトロン周波数  $f_H$  及び磁場の伏角  $I$  の関数である。いま  $N(h)$  をある短かい区間で適当な形に仮定する。例えば、F層最大電子密度の高度から上では拡散平衡状態にあるとして、

$$N(h) \cong N(h_0) \exp\left[\int_{h_0}^h \frac{dh}{H}\right] \quad (5)$$

と表わす。この式を参考にして、 $h$  の小さな区間  $h_0$  と  $h_1$  の間では

$$dN = \frac{N}{H} dh \quad (6)$$

であるから、

$$h = h_0 + a_1 l_n \frac{N}{N_0} \quad (7)$$

となる。ここで、 $N_0$  は衛星近傍の電子密度であるとする。式(7)の関係から式(3)は変形され

$$h'(f_1) = a_1 \int_{N_1}^{N_0} \frac{n'}{N} dN \quad (8)$$

が得られる。変数と密度  $N$  から  $X (\equiv f_p^2/f^2)$  に変換すると、(8)式は

$$h'(f_1) = a_1 \int_{X_1}^{X_0} \frac{n'}{X} dX \quad (9)$$

となる。反射点の磁場とプラズマ密度の関係は、異常波の場合に

$$X_1 = 1 - Y_1 \quad (10)$$

である。(9)式の積分は反射点での群速度が零になる事から適当な変数変換をして収束するようにする。今、

$$t^2 = 1 - \frac{X}{1 - Y_R} \quad (11)$$

で定義される変数  $t$  を導入する。ここで  $Y_R$  は反射点での  $Y$  の値をしめす。(11)式は微分型で

$$dX = -2(1 - Y_R) t dt \quad (12)$$

となり、(9)式は

$$h'(f_1) = -a_1 \int_0^{t_0} 2(1 - Y_R) \frac{n'}{X} t dt \quad (13)$$

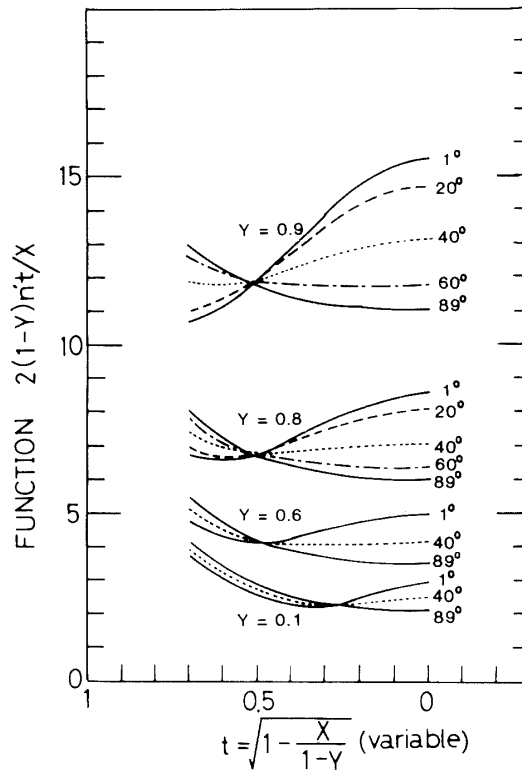
となる。反射点での磁場の値は今未知なので衛星高度の値で代表させて ( $Y_R \equiv Y_0$ ) 積分が実行される。(13)式に於て、被積分関数の振る舞いを詳細に見ていくと、第8図に見られるように、ゆるやかな関数になっている。(13)式から直ちに  $a_1$  が求められ、その結果、衛星直下の第1層の下限の高度及び電子密度が求められるが、得られた値 ( $h_1, N_1$ ) はこの層の間で磁場が変化しないという仮定のもとに求められたものであり、正しい値をしめすとは限らない。従って、ここに反復法の必要が生ずる。第1層での層の上部 (すなわち衛星高度) での  $Y$  の値を  $Y_0$  下部での値を  $Y_1$  として、その間で  $Y$  は

$$Y = \frac{Y_1}{\left\{ 1 + \left[ \left( \frac{Y_1}{Y_0} \right)^{1/3} - 1 \right] \frac{(h - h_1)}{(h_0 - h_1)} \right\}^3} \quad (14)$$

という形で変化するとする。この式の中で、 $h$  は  $X$  と

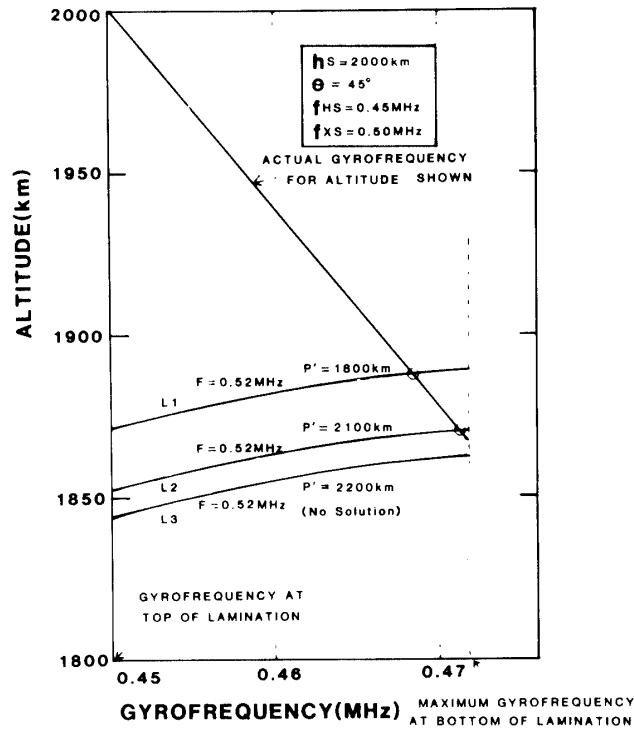
$$h = h_0 + a_1 l_n \frac{X}{X_0} \quad (15)$$

の関係がある。

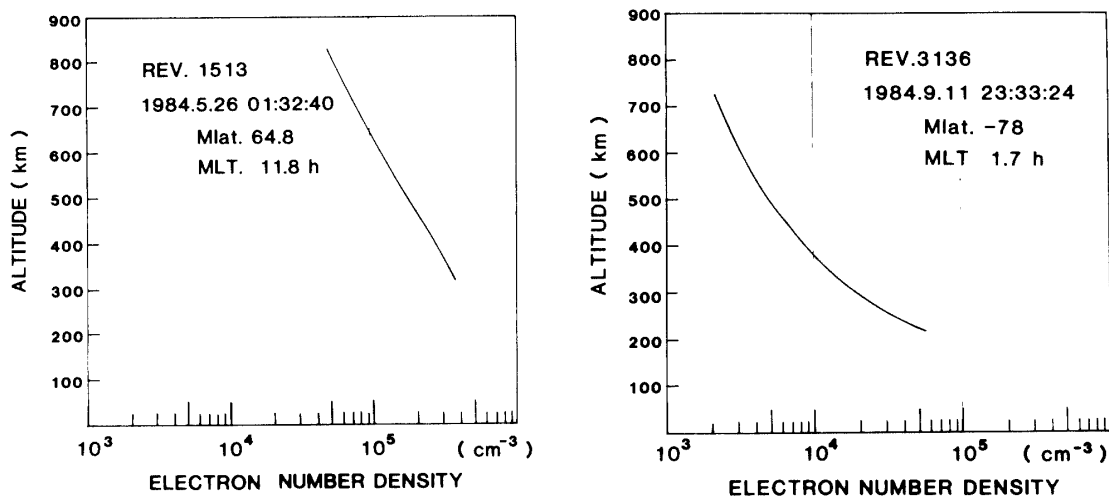


第8図 被積分関数  $2(1 - Y)n't/X$  の変化

第1層の下部での磁場の値を  $f_{H_0}$  から変化させ、再び求め直した高度をしるしたものが第9図である。ここで  $f_H$  の取り得る範囲の下限は、衛星高度の値  $f_{H_0}$  であり、上限は密度一定のまま伝播した時に迎える反射点での磁場強度である。反復法の概念は仮定した  $f_{H_1}$  と、反射点での  $f_{H_1}$  が一致するポイントを見出す事である。第9図に於てカーブ  $L_1$  及び  $L_2$  は解を有するが、 $L_3$  は持たない。非常に大きな密度変化が生じて式(13)が、解けなくな



第9図 サイクロトロン周波数と反射点高度の関係



第10図 計算で求められた電子密度の高度プロファイル。昼側(a)と夜側(b)では構造的に大きな差が見られる。

った事を意味する。

この方法を適用し順次下側へと電子密度分布のプロファイルを求める計算を実行しているが求めた電子密度の高度プロファイルの例を第10(a)及び10(b)図にしめす。

#### 4. 観測結果

科学衛星 EXOS-C (OHZORA) 搭載のプラズマサウンダー (PPS) は 1984 年 5 月に行われたアンテナ全伸展以来、観測が開始されたが現在順調に観測を続けている。サウンダー観測の主目的は、降下粒子とプラズマ大気の相互作用の解明にあり、自然プラズマ波動現象、降下粒子データと共にプラズマの生成、擾乱の発生等に見られる現象を観測し、エネルギーの解放過程を明らかにしていく。本章では現在得られている観測データを基にその成果の現状を報告し、今後期待される成果への準備とする。

##### 4-1 極域波動粒子相互作用とプラズマ擾乱

EXOS-C (OHZORA) は、1日に約15周回分南北のオーロラ帯を通過し、極冠の領域に至る。これらの領域では、に降下する粒子群が激しくプラズマ大気と相互作用を起こすが[4]、それをしめす代表例が第11図である。観測は昼側、不変地磁気緯度80度近くのカस्प域で行われており、約2分間に得られた連続する4枚のイオノグラムをしめしている。粒子降下に起因すると思われる強い波動が、先の2枚のイオノグラムに顕著に見られ、そのひとつはプラズマ周波数から高域混成共鳴周波数にかけて、他のひとつはZモードの領域に観測されている。又この領域では強いスプレッドF現象が見られている事から、かなり不規則な密度構造が衛星近傍に生成されている事が判明する。続く2枚のイオノグラムでは波動現象が静まり、同時にスプレッドFエコーが遅延時間を持って受信されるようになる。

このイオノグラムで、他の注目すべき波動現象は低周波域に見られるホイスラーモードの波動である。特に興味を持たれるのは、波動の周波数の上限(約700kHz)が衛星近傍のサイクロトロン周波数(約1MHz)に至っていない事で、これはかなり遠隔域(高い高度)に源をもつ波動が下降伝播して到来している事を示している。

以上の諸現象を統一的に説明するモデルを第12図にしめすが、粒子降下域は空間的にかなり局在化している事が特徴である。まず観測当初衛星はこの降下域の中にあつて、ここに励起された波動を観測している。これと同時にスプレッドFを生む様なプラズマ擾乱が発達している。やがて衛星がこの粒子降下域をぬけても、ホイスラーモード波は継続して受信される。これはその発生領域が同じ降下粒子にかかわっていたとしても、衛星レベルよりはかなり高い高度3000km近くに源をもっている事による。

自然プラズマ波動及びプラズマ擾乱の発生を降下粒子と直接的に比較した例を、第13図にしめす。降下粒子のデータは、E-tダイアグラムに編集される。縦軸に電子及びイオンのエネルギーを横軸に観測時間がとられている(第13図左)。同図には降下粒子の顕著に観測された領域が、2ヶ所明瞭にしめされている。一方、波動データはダイナミックスペクトルの形式に編集されめいるが、通常自然波動のスペクトルの他に、ここには特に能動的に励起された各種の波動が含まれている。さらに、電磁波として示されているものに



スプレッドエコーがあるが、これらはひとつには Z モードに、他のひとつに X モードとして顕著に示されている。

スプレッド F の発生は粒子データと明瞭な対応が見られる現象である。第 13 図の観測

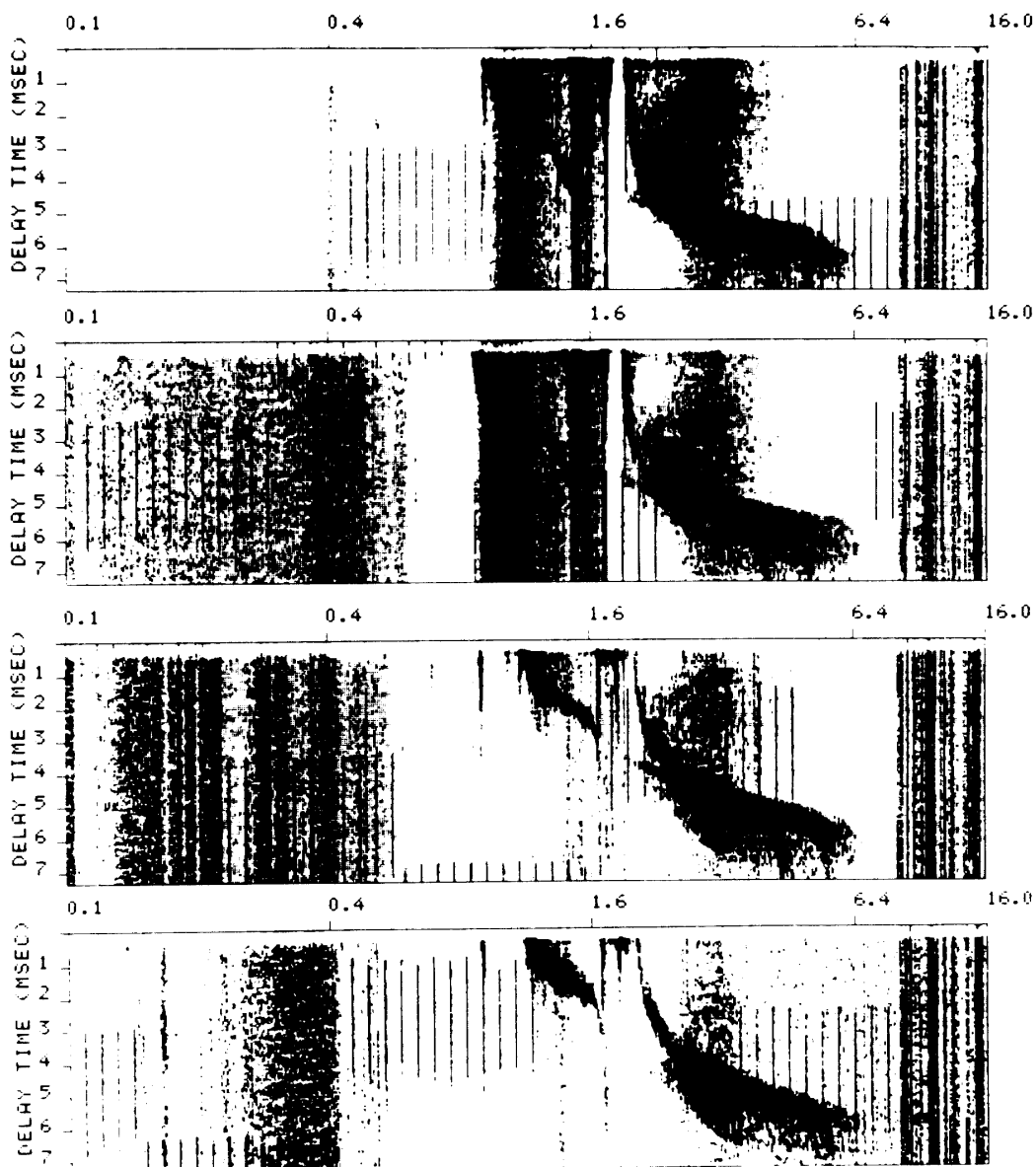
## EXOS-C / Planetary Plasma Sounder

**DATE 84.06.14**

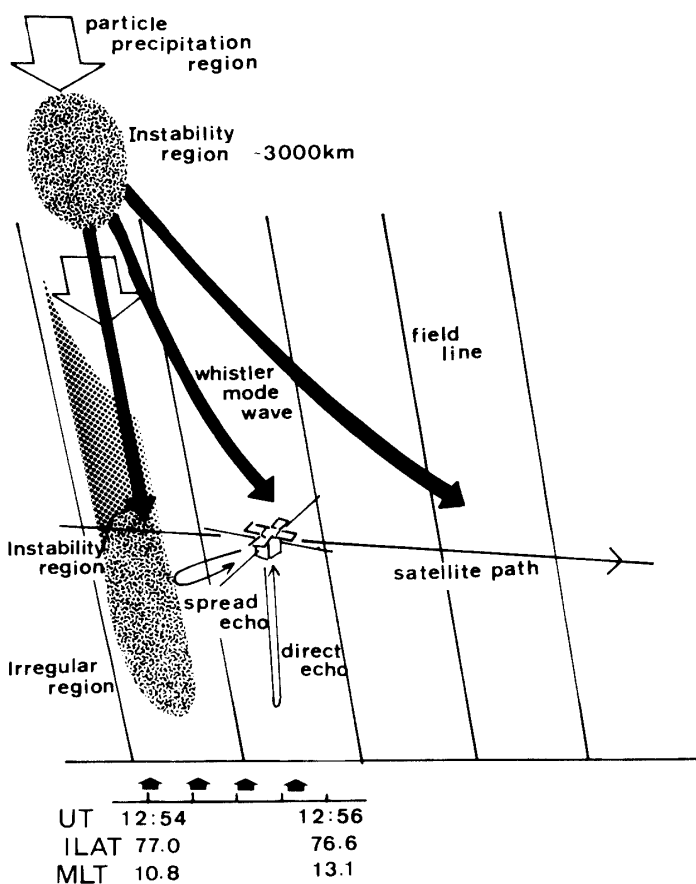
**REV. 1803**

**UT. 12:54:01**

FREQUENCY (MHZ)

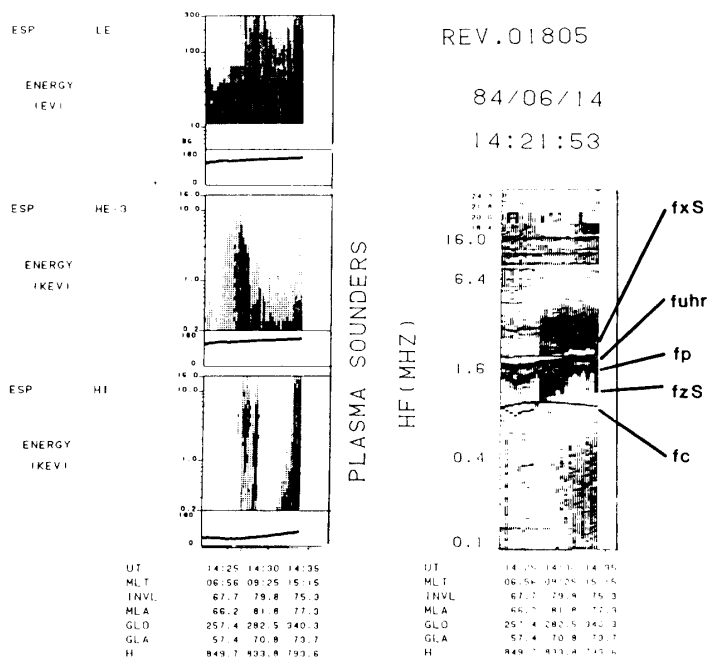


第 11 図 極域波動粒子相互作用をしめすイオノグラム。観測は、1984年6月14日、Rev 1803に行なわれた。



第12図 観測結果を説明するモデル図

EXOS-C SUMMARY PLOT



第13図 EXOS-C観測サマリープロット。E-tダイアグラム(左)とダイナミックスペクトル(右)が同時に興味ある現象をしめしている。観測は1984年6月14日に行なわれた。

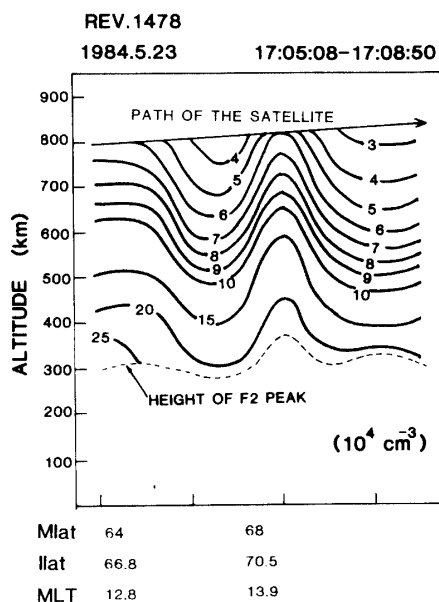
データでは、UT 14:26 から粒子の現象が観測されているが、これと呼応してスプレッドエコーが発生する事から、粒子降下域では衛星の高度に至る高い高度まで、電子密度の不規則構造が存在する事が見い出された。更に粒子降下との対応が見られる現象に、ホイスラーモード波が観測されている。これは衛星レベルより高い高度で発生し、伝播して来ている事を考えてみても、衛星で観測した粒子群と同じ現象にかかわっている事をしめすものである。

以上の観測結果は、波動粒子相互作用が、プラズマ中に擾乱構造を生じさせるプロセスを明らかにしているもので、今後さらに究明していく事が重要である。

#### 4-2 電離層プラズマの立体的計測

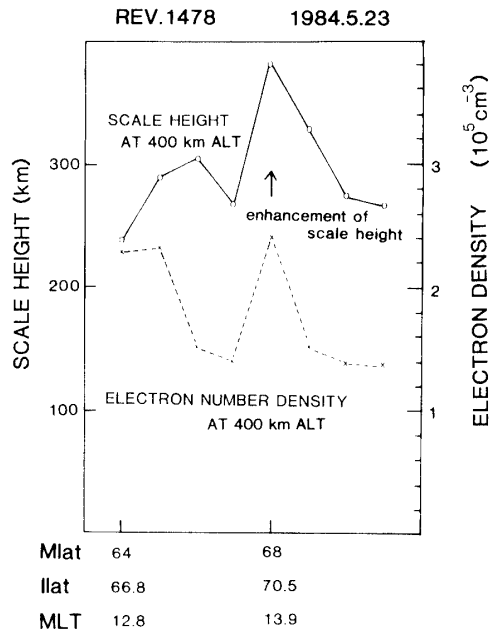
電離層からのエコー電波の解析（3章参照）により、電離層プラズマの立体的計測がなされた。第14図には、プラズマポーズ効果が電離層に反映されている現象としてのトラフ構造及び極域でしばしば観測されるピーク（山）構造がしめされている1例をしめす。この例では衛星は一旦トラフ域に出た後に、電子密度のピーク領域に突入するが、この時スケールハイトに大きな変化が見られる。つまり、このピークに相当する領域で、高度400 kmでのスケールハイトの値が約50%増加している（第15図参照）。これに対して700 km高度ではほとんど変化が見られない事から選択的に低い高度で加熱が生じている事をしめしている。エネルギーの比較的低い降下粒子が、効果的にプラズマの加熱現象を引き起こしているものと思われる。

このような極域の山（ピーク）構造は、頻繁に観測されている。第16図に他の観測例をしめすが、大きく2つの山（ピーク）が見られる。これらの領域では、やはり前の例と同様

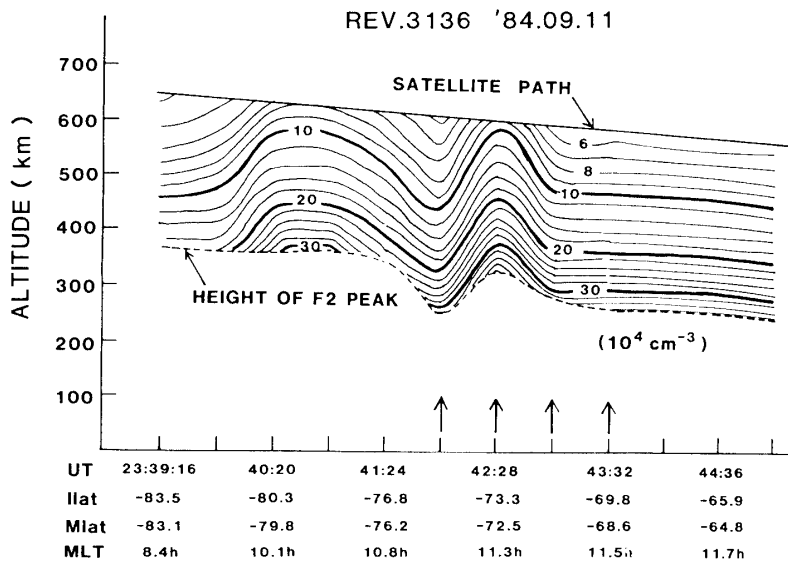


第14図 サウンダーデータから求められた電子密度の等密度表示。極域に密度の上昇部が顕著に見られる。観測は1984年5月23日、Rev 1478に行なわれた。

スケールハイトの増大が観測されている。図中矢印で示した時間での、イオノグラムを第17(a)~(d)図にしめす。密度の増加する領域では、プラズマ周波数から高域混成共鳴周波数にかけて、非常に強い波動がイオノグラムに明瞭に見られる。これと同時に、スプレッド F の受信から衛星近傍に密度の不規則構造が生じている事が判明する。明らかにエネ



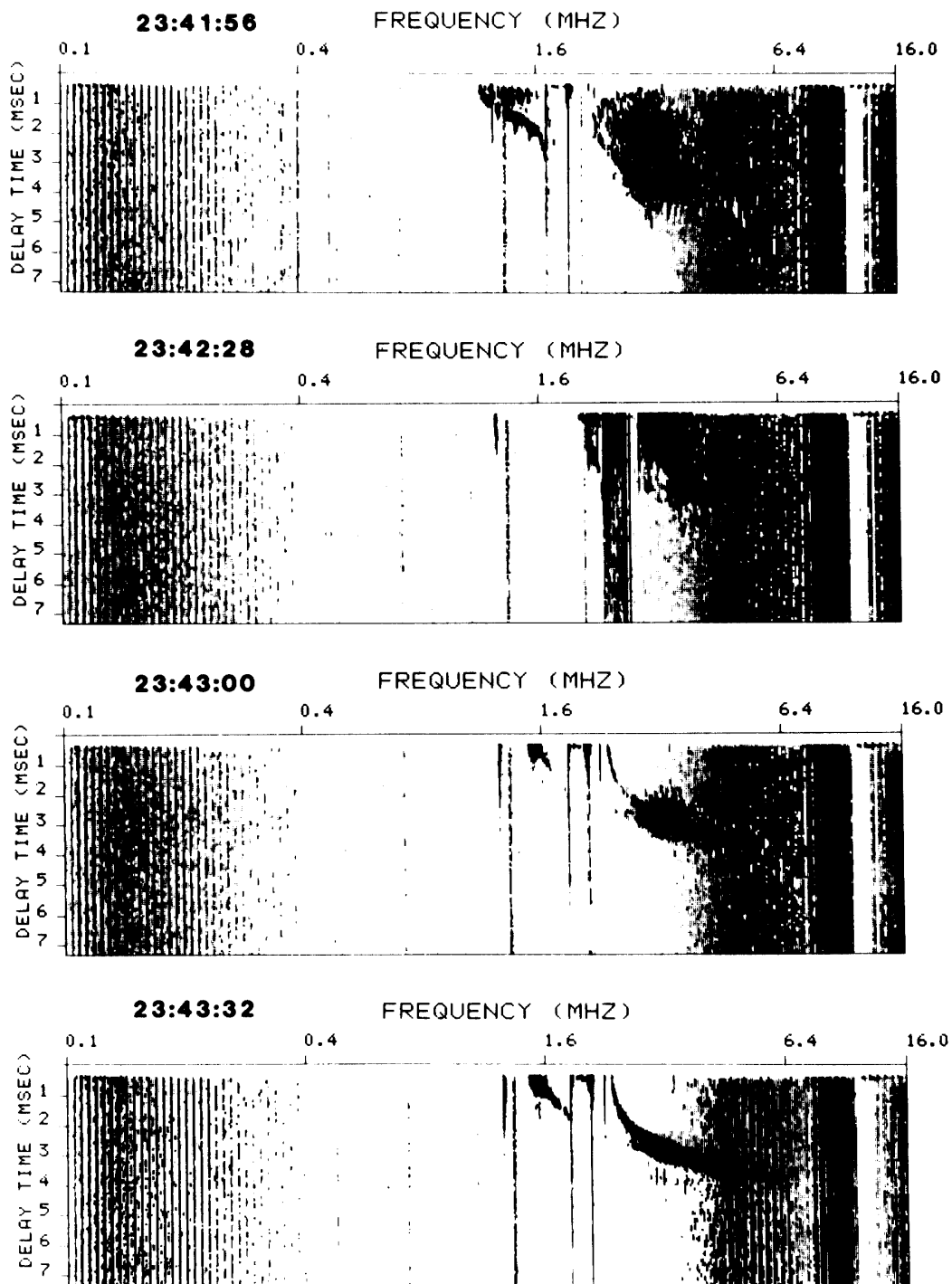
第15図 Rev 1478の観測データから算出されたスケールハイトの変化。グラフの横軸には観測時の衛星の緯度及び地方時をしめしている



第16図 Rev 3136で観測された極域電離圏の電子密度分布。2つの顕著なピーク（山）構造が観測されている

ルギー粒子が降り込んでいる事が示され、その結果、電離層の加熱、電離の促進が実現していることをしめす観測である。

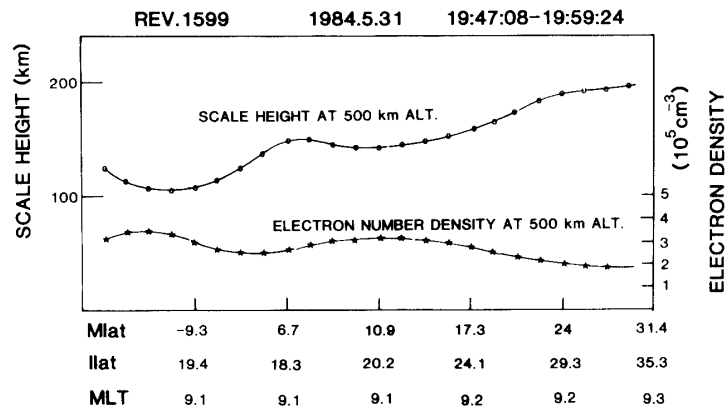
極域に注入されたエネルギーは、磁力線を横切る方向に、低緯度に伝わっていく。スケ



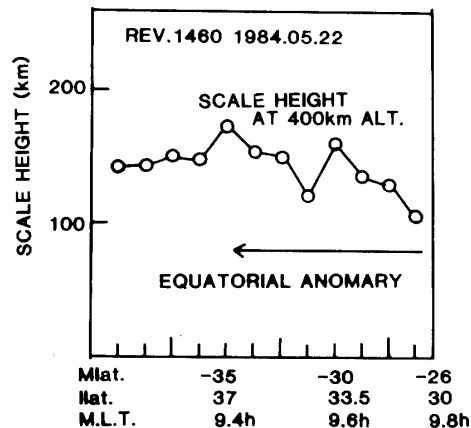
第17図 Rev 3136で極域の山に突入する前後の連続するイオノグラム

ールハイトの変化から温度の変化をみると、低緯度での観測では、第18図、第19図に示すように、約150 km という値になっている。(対応する電子密度の立体分布は、第20図及び第21図にそれぞれ示されている。) トラフ領域で約300 km であったスケールハイトは、赤道域では約1/2になっている。両者とも、それぞれF層ピークのすぐ上部での高度での観測値であることから、組成はほとんど同一として良く、従ってこのスケールハイトの緯度依存は有為な温度変化によるものと思われる。第22図には、中緯度でのスケールハイトの値を示している。緯度の増加に伴う、ゆるやかなスケールハイトの増加が見られ、高緯度ほど温度が高いという結果を与えることになる。

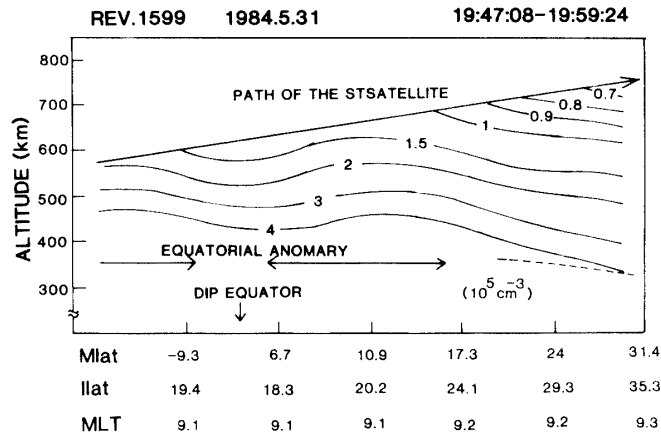
極域に注入されたエネルギーは、一部は、T.I.D. (Traveling Ionospheric Disturbance) の形で、低緯度に伝わっていくことが、示されている[5]。EXOS-C (OHZORA) でも、波状に変化するプラズマの構造を観測している。第23図に観測例をしめすが、空間的に約600 km のくり返しをもって密度が波状に変化する様子が明瞭に見られる。そして、その変化量はバックグラウンドに対して20~30%である事も、過去の報告[5]と一致する



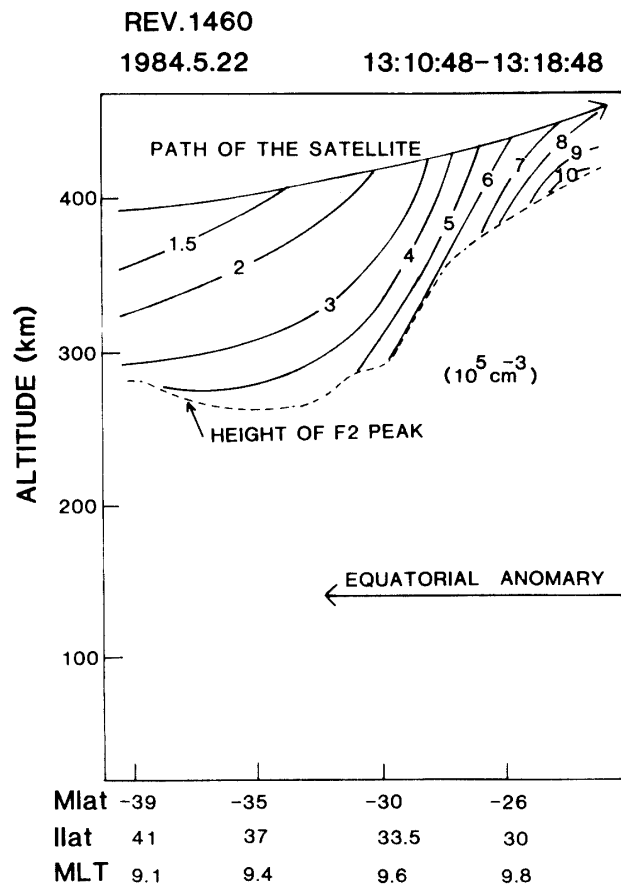
第18図 Rev 1599の観測データから算出されたスケールハイト。トラフ域のスケールハイトの値の約1/2になっている



第19図 Rev 1460の観測データから算出されたスケールハイト

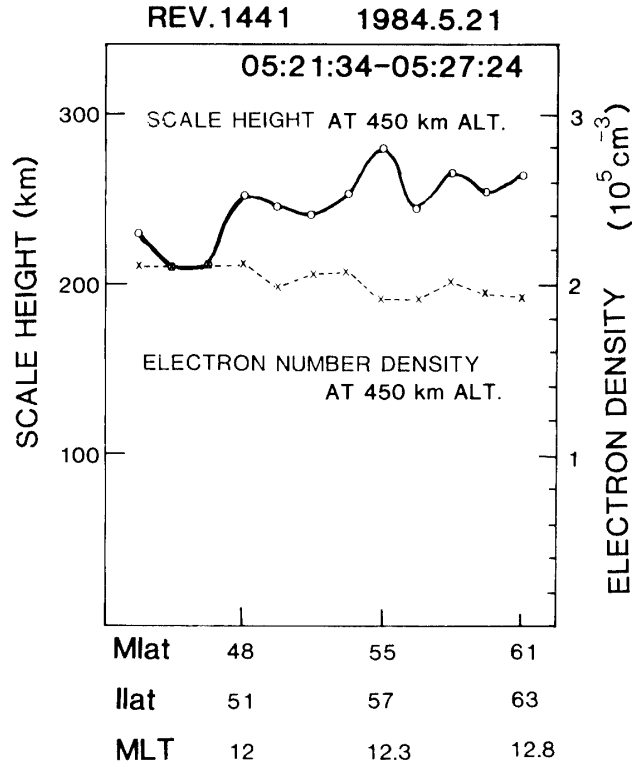


第20図 Rev 1599で観測された朝側の赤道域電離圏の電子密度分布。磁気赤道をはさんで赤道異常が、発達している。

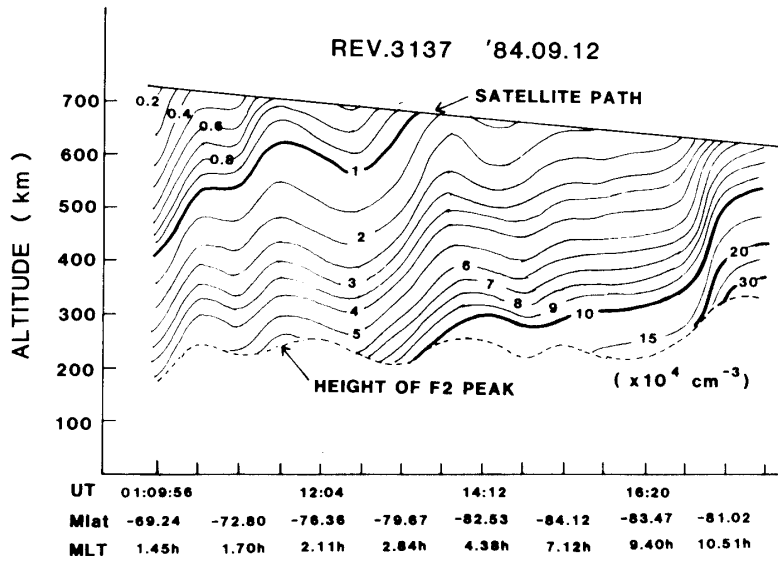


第21図 Rev 1460で観測された赤道異常。このパスでは衛星は低い高度からサウンディングをしている。

事から T.I.D. を観測したものと結論される。第23図に示した観測は広い Local Time に渡っているが、特に夜側で T.I.D. は顕著であり、その変化は経度というよりも、むしろ緯



第22図 中緯度でのスケールハイト。観測は1984年5月21日、Rev 1441に行なわれた。



第23図 波状的变化をしめす電子密度の立体分布。観測は1984年9月12日 Rev 3137で行われた。



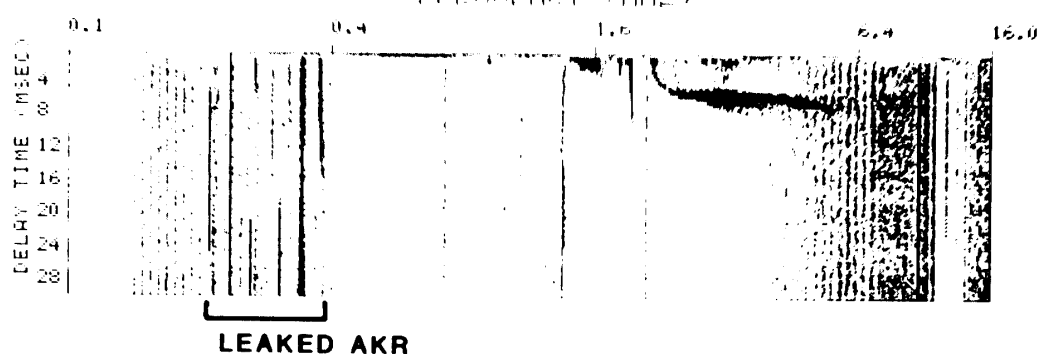
度変化に依っている。従って極域から低緯度へ、緯度を横切る形で T.I.D. が伝わっているものと思われる。

#### 4-3 AKR の漏洩成分の観測

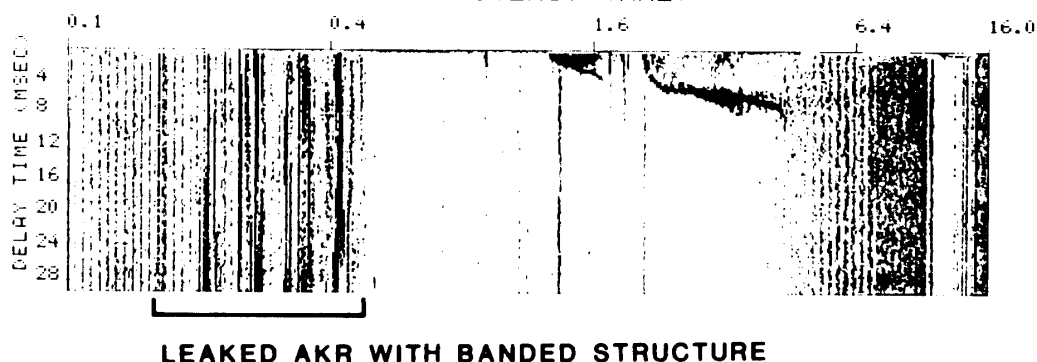
すでにその事実を予測していたが、PPS の自然電波観測（本特集号参照）でも明らかになった様に、下側に漏洩する AKR を EXOS-C (OHZORA) では観測している。結果を

## EXOS-C PPS

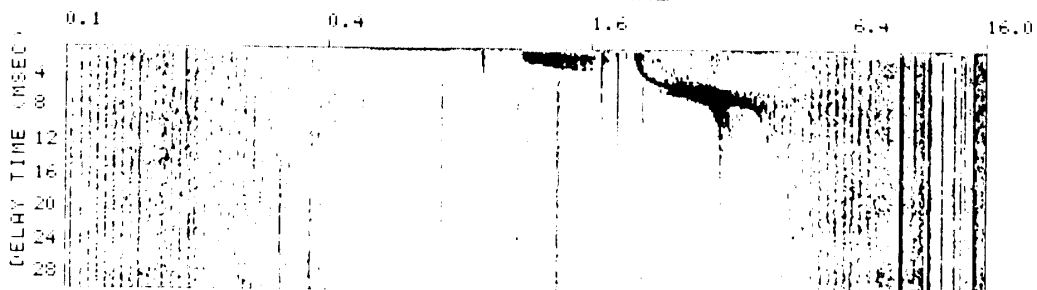
DATE 84.05.25 REV. 1507 OG 403C H F GA-L  
UT. 15:49:55



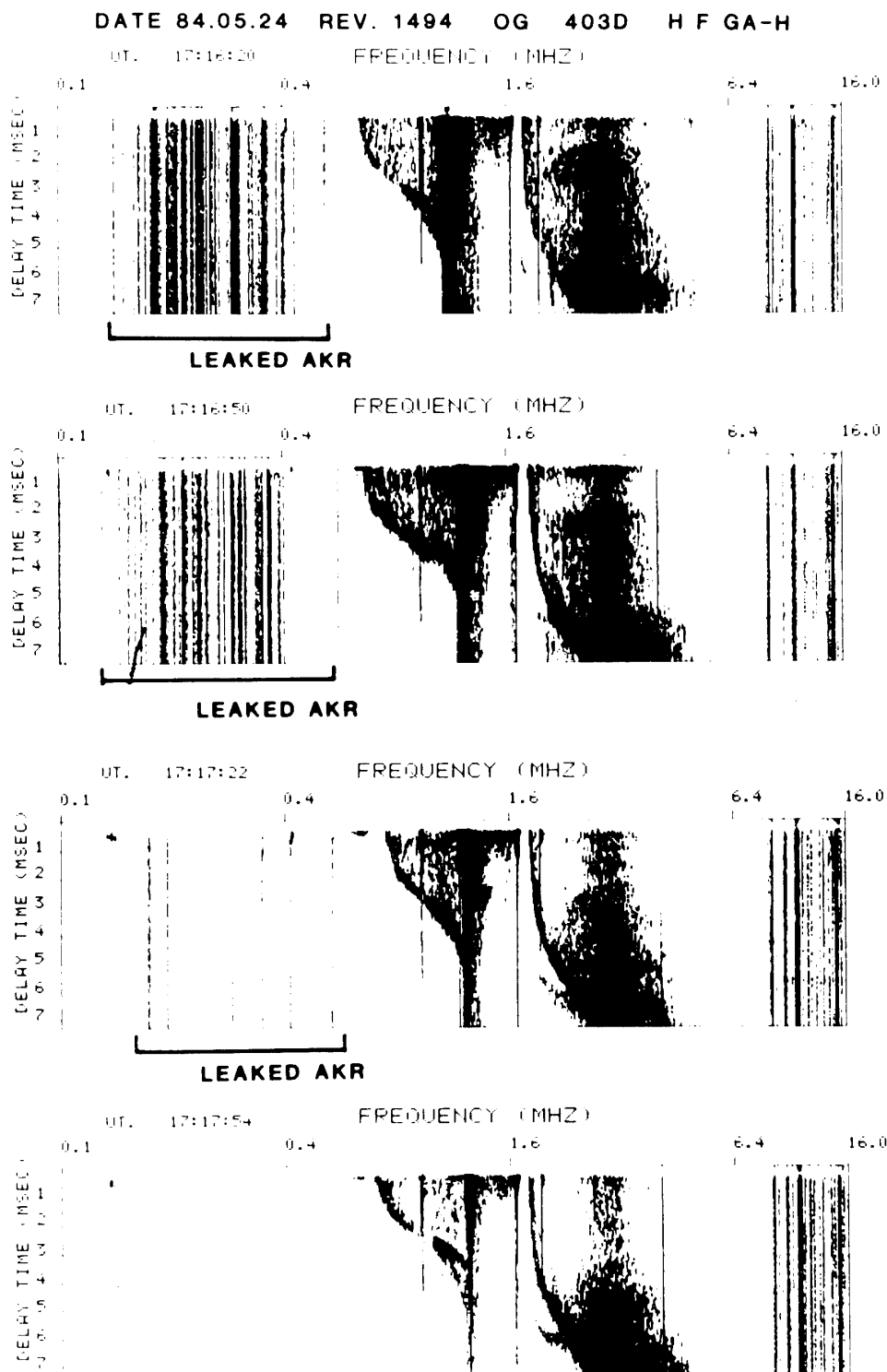
UT. 15:50:23



UT. 15:50:55



第24図 AKR の漏洩成分の観測例。いくつかの細いバンドから成るのが特徴で、早い時間変化が新たに見い出された。



第25図 AKR の漏洩成分の観測例。AKR を発生させた粒子が衛星近傍に静電波を励起させると共に、スプレッド F を生じさせる様な、乱れを電離圏プラズマ中に作っている姿が明瞭に観測されている。

第24図及び第25図にしめすが、非常に激しく時間的に変動する点が注目される。これは、AKRの激しい息づきを物語っている事実として重要である。

観測されているモードは、イオノグラムに現われている各種の共鳴から明らかにホイッスラーモードにある事が判かる。従って、電波としてのAKRはCut offを受けて直接伝播してくる事は出来ない。この事は、加速域で生成されたAKRが、伝播の過程でホイッスラーモード波に変換されて、EXOS-C (OHZORA) 高度まで達している事をしめしており、更にこの事はAKRのOriginが分散曲線の上でホイッスラーモードのブランチと相接するL-Oモード波である事を物語っている[6]。

以上の事は、AKRの生成理論として提出されているモード変換[7]を強く指示するものである。

## 5. 結 語

EXOS-C (OHZORA) に搭載の、惑星プラズマサウンダー (PPS) は、アンテナ伸展後、多くの興味あるデータを提供しつつ現在順調に観測を続けている。PCM方式によるデジタルサンプリングで多量情報を送る点、他のサウンダーとは異なるユニークなデータ取得法を用いたが、2ビットという驚くべき小容量のデータであっても十分な物理量を提供する事が可能となった。しかも、デジタルデータという特質から計算機処理が容易になったという利点があげられる。

このようにして得られたイオノグラムから電離層の立体的な構造の計測が可能になり、赤道異常、中緯度トラフ、及び極域のピークと言った特徴ある構造が得られた。特に極域では降下粒子がプラズマを加熱し、同時に、電離を促進する姿が明瞭にとらえられた。又、スケールハイトの解析から電離層温度の緯度依存性が観測され、極域に注入されたエネルギーが低緯度に伝わる様子が明らかになった。さらに、電離層の立体的計測に加えて従来充分に究明されていないプラズマの擾乱に関して新たな事実が得られた。つまり、降下粒子が結果として生ずる波動粒子相互作用を介して、密度の乱れを電離層プラズマ中に生じさせている事実が明らかになった。

イオノグラムに現われる各種のプラズマ共鳴現象の応用のひとつとして、自然プラズマ波のモード決定が実施された。その結果、粒子降下域では、強い強度の静電波動が生成される事が判明し、従来知られているZモード放射が、これら静電波と密接な関係にある事が観測上明らかになった。一方、降下粒子にかかわる現象として、ホイッスラーモード波の観測があげられるが、データは、高い高度で生起する微視的プラズマ不安定の存在を示すことになった。

EXOS-Cの波動観測によって発見されたのであるが、地球側に漏洩するAKRの存在がサウンダーモードでも、観測された。この事は、波動観測でも実証されているが、AKRの発生理論として提出されているモード変換論を指示するものである。特にサウンダーモードの観測で新たに発見された事実としては、非常に激しく時間的に変動する点があげられる。

### 謝 辞

最後に、EXOS-C (OHZORA)の実験を成功させ、一連の観測を遂行してゆくにあたり、文部省宇宙科学研究所伊藤富造教授、M-3 S-4号ロケット主任林友直教授はじめ EXOS-C/M-3 S-4班全員の努力と支援に深く感謝し、又、機器製作に協力いただいた、明星電気(株)の方々の努力に感謝すると共に、観測に当り、OHZORA 追跡の支援班のスタッフの方々に深く感謝する次第である。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Franklin, C. A., and M. A. Maclean, The Design of Swept-Frequency Topside Sounders, Proc. IEEE, **47**, 897, 1969.
- [ 2 ] Oya, H., T. Ono, and T. Kamada, Simulation of Plasma Waves in the Magnetosphere Using Satellite JIKIKEN (EXOS-B). Part I. Observation of Plasma Resonance, J. Geomag. Geoelectr., **33**, 3, 1981.
- [ 3 ] Jackson, J. E., The Reduction of Topside Ionograms to Electron-Density Profiles, Proc. IEEE, **47**, 960, 1969.
- [ 4 ] Oya, H., and A. Morioka, Instrumentation and observation of Gyroplasma probe installed on TAIYO for measurement of ionospheric plasma parameters and low energetic particle effects, J. Geomag. Geoelectr., **27**, 331, 1975.
- [ 5 ] Oya, H., T. Takahashi, A. Morioka, and H. Miyaoka, Wavy Patterns of Ionospheric Electron Density Profiles Triggered by TID—Observation Results of the Electron Density by TAIYO Satellite, J. Geomag. Geoelectr., **34**, 509, 1982.
- [ 6 ] Oya, H., and A. Morioka, Observational Evidence of Z and L-O Mode Waves as the Origin of Auroral Kilometric Radiation From the Jikiken (EXOS-B) Satellite, J. Geophys. Res., **88**, 6189, 1983.
- [ 7 ] Oya, H., Conversion of Electrostatic Plasma Waves into Electromagnetic Waves: Numerical calculation of the dispersion relation for all wave lengths, Radio Sci., **6**, 1131, 1971.