

## EXOS-A 搭載 プラズマ 波 観 測 器

柴田 喬\*・中村良治\*\*・芳野起夫\*・伊藤富造\*\*

### Plasma Wave Detector on EXOS-A

Takashi SHIBATA\*, Yoshiharu NAKAMURA\*\*, Takeo YOSHINO\*  
and Tomizo ITOH\*\*

**Abstract:** The IMS satellite EXOS-A (1978-014A) launched into a quasi-polar eccentric orbit on February 4, 1978, includes in its payload a plasma wave detector, which has one broadband channel and eleven bandpass channels covering the frequency range 400 Hz to 3 MHz. Each channel is connected to an electric dipole antenna and two Faraday cups. Since the Faraday cup responds to electron density fluctuation only, examination of sensor dependence of the detected wave spectra allows electrostatic and electromagnetic waves to be distinguished. The present note gives a gist of the EXOS-A plasma wave experiment and related instrumentation.

**要旨.** 1978年2月4日に打ち上げられたIMS参加衛星EXOS-Aには、プラズマ波観測装置(ESW)が搭載されている。本装置の受信部は、1個の広帯域チャンネルと11個の狭帯域チャンネルからなり、400 Hz から 3 MHz までの帯域をカバーしている。センサー部は、ダイポールアンテナと、方向を違った2個のファラデーカップを使用しており、電磁波と静電波の区別と、静電波の伝搬方向の決定を可能にしている。

この小論では、プラズマ波観測装置とその運用について概要を述べるとともに、初期観測で得られたプラズマ波動のスペクトル例を紹介する。

### 1. はじめに

東京大学宇宙航空研究所第5号科学衛星EXOS-Aは、1978年2月4日に鹿児島宇宙空間観測所から打ち上げられた。この衛星は、わが国の国際磁気圏観測計画(IMS)参加の一翼を担うもので、遠地点高度 3977 km, 近地点高度 642 km, 軌道傾斜角  $65.4^\circ$  の準極軌道を、周期 134 分で周回している。国際標識は 1978-014A, 和名として「極光」と名付けられた。我々は、この衛星にプラズマ波観測器(略称 ESW)を搭載させており、極域超高層を中心にプラズマ波動を受信観測し、磁気圏-電離圏のカップリンクの様子とダイナミックスを、波動-

\* 電気通信大学応用電子工学科, Department of Applied Electronic Engineering, University of Electro-Communications, 5-1, Chofugaoka 1-chome, Chofu 182

\*\* 東京大学宇宙航空研究所, Institute of Space and Aeronautical Science, University of Tokyo, 6-1, Komaba 4-chome, Meguro-ku, Tokyo 153

粒子、波動-波動相互作用の観点から解明・研究することを目指している。搭載計器類は順調に動作しており、すでに種々のデータを伝送してきている。

衛星による超高層プラズマ波動の観測は、これまで磁気圏全域にわたって数多くなされてきており、いろいろなモードの存在と、その分布・姿態および役割について研究されてきた。その中で最近特に、新しい問題としてあらためて注目をあびているのは、静電プラズマ波モードの波動である。静電波は電磁波にくらべ位相速度が遅く、低エネルギー粒子の速度と同程度となるため、粒子による波の増幅や、静電波による粒子の加速・加熱等、いわゆる波動-粒子相互作用が起きやすい。さらに、静電波そのものは、縦波・短波長という特性のために局所的なものであるが、伝搬途中の媒質不均一のためにモード変換が起こり、遠達性のよい電磁波を生む可能性がある。このことは、オーロラに関連した極域波動現象の重要な要素の一つとなっている。

KELLEY (1977) は、極軌道衛星 S3-3 がオーロラ領域を通過する際に、強いイオンサイクロトロン静電波の乱れを検出したことを報告している。それら乱れの領域では、静電ショック対がよく見られ、その構造から、オーロラ粒子の加速や、オーロラアーク構造の形成、プラズマ波動の励起等との関係が重要視されている。Hawkeye-1, Imp-6 衛星を用いたより広い領域での観測 (GURNETT and FRANK, 1977) によれば、オーロラ磁力線沿い超高層でのそれら静電ノイズは、高度数千 km の電離層上部から数  $R_E$  の磁気圏深くに至る広範囲な領域で、しかも広帯域なスペクトル構造をもって存在しているらしい。それらノイズ領域は、沿磁力線電流、逆 V 字型スペクトルを持つ降下粒子、VLF, ELF ノイズ等、いわゆるオーロラに関連した諸現象の領域とほぼ一致しており、極域現象における静電プラズマ波の果す役割の重要性が、より一層認識される。

EXOS-A 衛星のサブシステム ESW は、ダイポールアンテナとファラデーカップを用いて、プラズマ波動を同時受信している。前者で波動の電界成分を受信し、後者で静電波にともなう電子密度振動を直接検出しようとするものであり、400 Hz から 3 MHz までの広い周波数帯域を観測している。ファラデーカップは衛星の姿勢を考慮して 2 個用意されており、静電波の方向依存性を検出しようとしている。以下、本報告において、当サブシステムの計器類およびその運用についての概要を述べる。

## 2. 第 5 号科学衛星 EXOS-A

EXOS-A 衛星の大きな特徴の一つはその姿勢である。本体から両側にそれぞれ約 2 m 伸び

た腕の先に磁石をとり付け、衛星のスピン軸に大きな磁気モーメントを与えることによって、スピン軸が常に地球磁界の方向にあるよう制御している。スピン率は非常に小さく、1 周回あたり数回転に押えられている。この沿磁力線姿勢ゆえに、種々の観測ではセンサーの配置を選ぶことによって、現象を磁力線に対して平行な成分と垂直な成分とに分離して測定することができる。もう一つの特徴として運用面があげられる。EXOS-A は、極域でのオーロラとその関連現象を観測することを主眼においた衛星であるため、極域テータのより多くの取得が、課せられた運用条件の一つとなる。そのためにテータ取得システムは、主局としての鹿児島宇宙空間観測所の他に、南極昭和基地にある国立極地研究所のテレメータ局と、北極圏に近いカナダのフォートチャーチルに設置した可搬型地上局を含めた、合わせて三つのテレメータ局で構成されている。このように多地点でテレメトリ観測を行うのは、わが国の科学衛星としてはじめてであり、これまで以上の多量かつ良質のテータが得られるものと期待されている。

搭載観測機器は、プラズマ波動の受信観測を目的とした ESW の他に、北極圏上空のオーロラ現象を真空紫外光で撮像する ATV、極紫外大気放射を観測する AUV、電子のエネルギースペクトルを調べる ESP、超高層での正イオン組成比とその分布を観測する MSP、それに、電子の温度と密度を測定する TEL、NEL の合わせて7つである。データ伝送は、搬送波 136.725 MHz の PCM 信号と、搬送波 400.45 MHz の PCM および FM (WB) 信号で行われている。PCM 信号の伝送速度は、低速時には 512 ビット/秒、高速時には 2048 ビット/秒、機上搭載テータレコーダ再生時には 8192 ビット/秒である。データ構成は、1 ワードが 8 ビット、1 基準フレームは 128 ワード、256 フレームで 1 サフフレームとなっている。

### 3. ESW 観測機器

ESW がプラズマ波動観測のために使用しているセンサーは、ダイポールアンテナと 2 個のファラデーカップである。ダイポールアンテナは、姿勢制御用磁石を固定しているブームに沿わせた被覆線で構成されており、片側約 2 m で、スピン軸に対して垂直に張られている。測定すべき波動の波長に比べて、アンテナ長(約 4.5 m)は非常に短いので、容量入力として動作すると考えられ、そのために入力抵抗は 1.1 M $\Omega$  と大きく設定した。ファラデーカップは、ダイポールアンテナと 90°をなす二方向に、一つは磁力線に垂直な方向を、他は磁力線と平行な方向を向いて、それぞれ約 1 m 繰り出してある(前者のファラデーカップを FC(A)、後者を FC(B) と呼ぶ)。カップは、外径 90 mm、内径 78 mm、厚さ 9 mm で、1 枚のグリッド

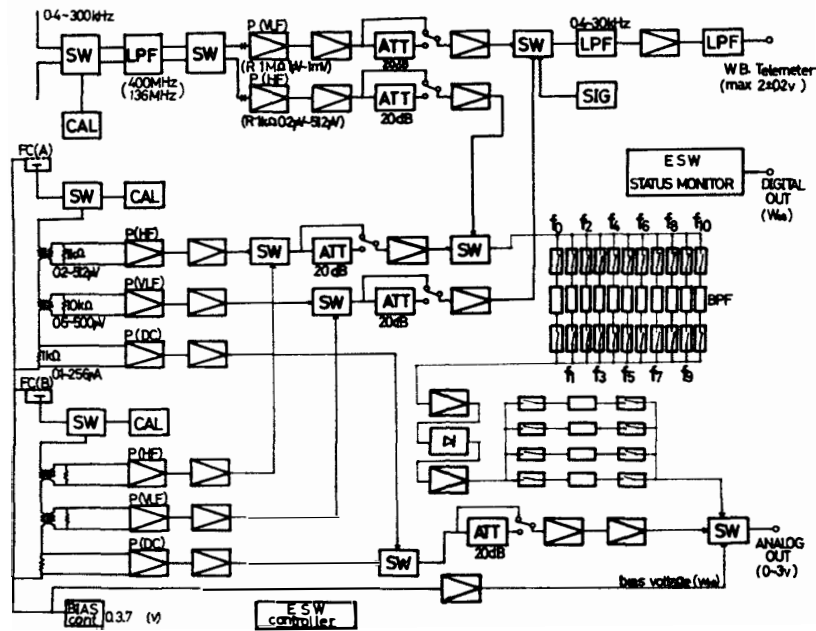


図 1 ESW 観測装置のブロックダイヤグラム

Fig 1. Block diagram for the ESW experiment

とコレクターからなり、グリッドの線径は 0.2 mm, ます目は 2.5×2.5 mm で、すべてに金メッキが施してある。グリッドとコレクターの間には直流バイアスを印加し、コレクターに捕集される電子電流の直流成分と交流成分を測定している。印加するバイアス電圧は 0, 3, 7 V のいずれかで、その選択は後述するコマンドによって行っている。以下、当サブシステムの回路のブロックダイヤグラムを、図 1 に示す。

観測する周波数帯域は、各センサー共に 400 Hz から 3 MHz までである。その中で 30 kHz 以下(ここでは VLF 帯と呼ぶ)は、400 MHz 帯の WB テレメータで地上へアナログ伝送し、45 kHz から 3 MHz まで(ここでは HF 帯と呼ぶ)の受信データについては、衛星機上サブシステム内の 11 個の帯域ろ波フィルタで周波数分析し、結果を 136 MHz 帯の PCM テレメータで伝送している。11 個の帯域ろ波フィルタは、45 kHz から 3 MHz までを対数的にほぼ等間隔になるよう分割して選んであり、それぞれの中心周波数は、45, 60, 90, 140, 220, 320, 500, 700 kHz, 1, 2, 3 MHz, Q 値はいずれも 10 である。ブロックダイヤグラムに示すように、観測周波数帯域とセンサーの組み合わせからくる 5 系統のラインには、それぞれ 20 dB の減衰器が切り換えにより組み込まれるようになっており、コマンドによって各系統のゲインの選択をおこなっている。各系統の高利得設定時での感度は、ダイポールアンテナによる VLF 帯の観測では 1 μV, HF 帯の観測では 0.2 μV, ファラデーカップによる VLF 帯では 0.5 μV, 同じく HF 帯では 0.2 μV, さらにファラデーカップで行う直流成分の観測では 0.1 μA となっ

ており、ダイナミックレンジは、WB テレメータで 60 dB, PCM テレメータで 68 dB である。ファラデーカップによる測定範囲を電子密度  $n$  の値で概算すると、 $10^3$ - $10^7$  個/cm<sup>3</sup> で、その変動率  $\Delta n/n$  については 0.1-20% である。

#### 4 観測モードとデータ伝送形式

この衛星では、各サブシステムの持つ観測目的の性質から、運用上 2 つのモードを設定している。一つは、主に北半球高緯度付近でのデータ取得を目的とする NP モード (north-pole mode) であり、他は、それ以外の中低緯度および南半球高緯度付近を目的領域とする GL モード (global mode) である。NP モードで動作するサブシステムは、ATV, ESP, NEL, TEL であり、本報告のプラズマ波動観測のための ESW サブシステムは、MSP, AUV, および ESP, NEL, TEL と共に GL モードで観測を行う。さらに ESW は、運用モードとしての GL

モードの中で、サブシステム独自の観測モードとして、VLF モード、ESW モードという 2 つの異なった観測を選択して行っている。これらのモードは、観測する周波数帯域とセンサーの組み合わせからくるもので、WB テレメータの内容および PCM テレメータの内容の、モードによる違いは図 2 のようになっている。WB テレメータは ESW の専用となっているが、PCM テレメータでは、偶数番号の伝送フレームのワード 28 から 127 ままで割り当てられている。

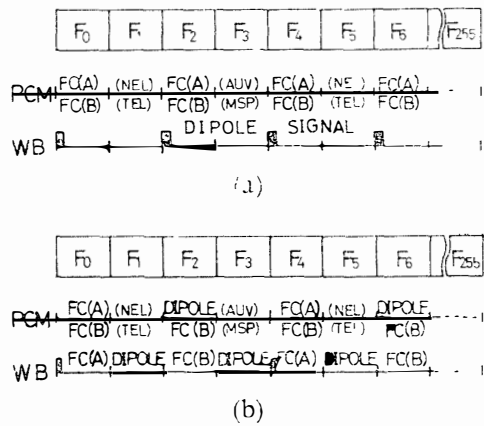


図 2 フレーム毎の伝送データ内容  
Fig. 2 Frame format of the telemetry data  
(a) VLF mode, (b) ESW mode

##### 4.1. VLF モード

このモードでは、VLF 帯の観測はダイポールアンテナのみで、HF 帯の観測は 2 個のファラデーカップのみでそれぞれ行い、前者を WB テレメータで、後者を PCM テレメータで伝送している。WB では、PCM テレメータの偶数フレームへの切り換え時に、30 kHz の判別信号を 1 ワード分だけ重畳して、相互のデータの対比を容易にするよう計っている (図 2a)。PCM テレメータ 1 フレーム中のワード構成は図 3 のようになっている。ワード 28 は後述する観測状況モニタであり、ワード 29 はファラデーカップに印加しているバイアス電圧の実効値を示している。ワード 30 以降が観測データで、30, 31 は FC(A) と FC(B) の直流電流値、

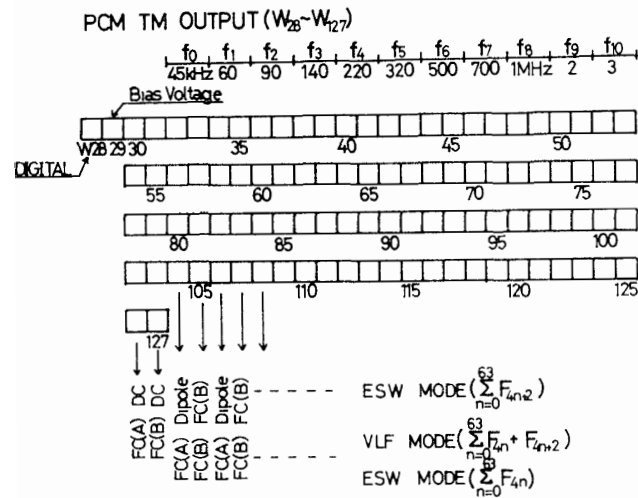


図 3 ワート毎の伝送データ内容  
Fig 3 Word format of the telemeter data

32 から 53 まてが、2 個のフェラデーカップで受信した HF 帯波動の、周波数分析結果 11 チャンネルの振幅値である。1 フレーム中で、直流電流の観測は 5 回、HF 帯交流成分の観測は 4 回繰り返される。このように、VLF モード観測では、HF 帯静電波の、方向（地球磁界に対して平行と垂直）による差異の検出と、VLF 帯プラズマ波動の、連続的なスペクトル変化の監視に重点を置いている。

#### 4.2. ESW モード

超高層プラズマ中、特にオーロラオーバルに根を持つ高緯度磁力線沿い領域で、静電波から電磁波へのモード変換の存在が指摘されている。この ESW モードでは、フェラデーカップとダイポールアンテナ両方で同じ周波数帯の観測を行い、主に静電波による電子密度振動に感応する前者と、電磁波、静電波を含めた一般のプラズマ波の振動電界に感応する後者の、受信状況の違いを調べることにより、モード変換の可能性と実態を探ることを目的としている。したがって、伝送データは図 2b および図 3 で示すように、PCM, WB とともにフレーム毎に受信センサーを切り換えている。

### 5. コマンドと観測状況モニタ

サブシステム ESW の動作制御を行うコマンドのリストを、表 1 に示す。実時間コマンドとして 10 項目、遅延コマンドとして 5 項目が用意されている。ESW 機器電源は、個別オンである ESW ON でスタンバイ状態となり、その後で運用モード指定コマンドである GL MODE ON を打つことによりオンとなる。この衛星の 400 MHz 帯テレメータは、その時の運用状態によって PCM, WB, RARR のどれかとなっているが、それを ESW の専用である

表 1 ESW 制御コマンド項目

Table 1. List of command to control the ESW experiment

Function	Real time		Delay time	
	AD	EX	AD	EX
GAIN 1	1	11		
GAIN 2	1	12		
VLF MODE ON	3	11	6	2
BIAS CONTROL	2	11		
ESW OFF	2	12		
GL MODE ON	5	8	5	0
CAL ON	4	10	4	2
CAL OFF	4	11	5	2
ESW ON	3	12	7	2
FC EXTEN ON	7	13		

表 2 ESW 観測状況モニタ

Table 2 Status monitor for the ESW experiment.

		$\sum_{n=0}^{63} F_{4n} W_{28}$	$\sum_{n=0}^{63} F_{4n+2} W_{28}$
B <sub>0</sub>	H	BIT RATE HIGH	BIT RATE HIGH
	L	LOW	LOW
B <sub>1</sub>	H	VLF MODE	VLF MODE
	L	ESW MODE	ESW MODE
B <sub>2</sub>	H	BIAS MON	CAL ON
	L		CAL OFF
B <sub>3</sub>	H	BIAS MON	GAIN 1 HIGH
	L		VLF LOW
B <sub>4</sub>	H	FC(A)SAFETY SW ON	GAIN 2 HIGH
	L	OFF	DIP HF LOW
B <sub>5</sub>	H	FC(B)SAFETY SW ON	GAIN 3 HIGH
	L	OFF	FC HF LOW
B <sub>6</sub>	H	FC(A)EXTEN OVER	GAIN 4 HIGH
	L	NOT OVER	FC VLF LOW
B <sub>7</sub>	H	FC(B)EXTEN OVER	GAIN 5 HIGH
	L	NOT OVER	FC DC LOW

WB に設定するためのコマンドが **VLF MODE ON** であり、同時に独自観測モードである **VLF** モード、**ESW** モードの切り換えも行う。以上 3 個のコマンド制御と、較正信号を印加して利得較正を行うための **CAL ON** および同 **OFF** の制御は、ともに遅延コマンドでも行え、最大 9 時間 4 分の遅延をかけられる。**GAIN 1**, **GAIN 2**, **BIAS CONTROL** のコマンドは、機器の項で述べたように、前二者で増幅器の切り換えを、後者でファラデーカップバイアス電圧の選択を行うものである。**FC EXTEN ON** は、ファラデーカップを衛星本体から繰り出すためのコマンドである。

観測機器の動作状態および観測状況は、PCM テレメータのワード 28 でモニタしている。そのビットパターンの表示内容を表 2 に示す。ビットの 0 と 1 では PCM テレメータの伝送速度と観測モードを表示している。ビット 2 から 7 まではフレームにより内容が交互に変化し、ある時は印加しているバイアス電圧とファラデーカップ伸展機構の状態モニタに使われ、他の時には、機器内 5 系統の増幅器の設定利得の状態表示と、較正信号を印加中か否かの表示に使用されている。

## 6. 初期観測例

初期観測データの典型例を図 4 と図 5 に示す。

図 4 は、Rev. 297 から 298 にかけてのほぼ一周回分の HF 帯観測データを、時間-周波数パワースペクトルとして対数表示したものであり、各周波数チャンネルの表示幅は約 50 dB である。ファラデーカップのデータには、捕集電子電流の直流成分もあわせて表示してある。ダイポールアンテナのデータに重ねて描いてある破線は、IGRF (International Geomagnetic Reference Field) 1975 に基づいた、衛星位置での電子シャイロ周波数の変化を示している。

受信ノイズの一般的な状態は、次のように大きく 3 種類の形態に分けられる。

### 1) 静電ノイズ

ファラデーカップでは、0020 UT 頃にみられるように、衛星高度が 1000 km 前後になる南半球中緯度領域で、顕著な交流ノイズを検知している。**FC (B)** (地球磁界に平行な成分) のみに入感していることと、220 kHz, 320 kHz チャンネル付近では雑音レベル以下になっていることは、他の周回データでも認められる特徴である。この時の地理的衛星位置は、南米ブラジル上空であり、指摘されている地磁気異常地帯と近接している。この地帯では荷電粒子の異常降下があるとされているが、交流ノイズの入感と同時に、直流電流成分が両ファラデーカップとも増加しているのは、その影響かもしれない。



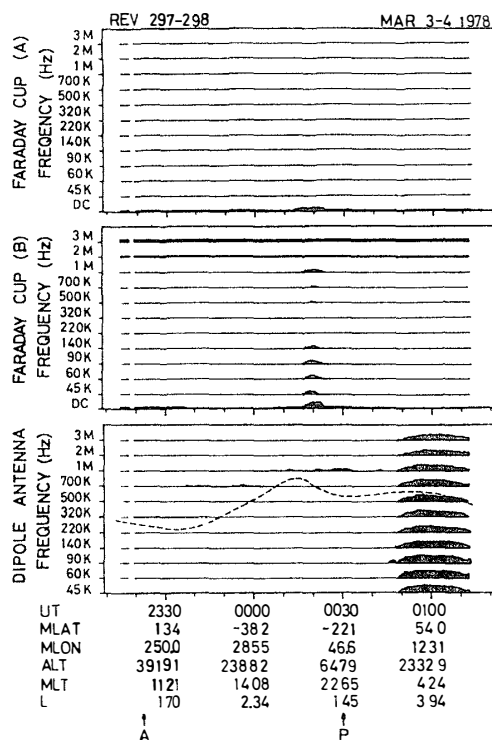


図 4 HF 帯プラズマ波観測データのパワースペクトル表示例。ファラデーカップによる捕集電子電流の交流および直流成分と、タイポールアンテナによって受信した電界の交流成分の強さを、各周波数毎に対数表示したものであり、各チャンネルのダイナミックレンジは約 50 dB である。横軸は観測時間 (UT) で、その時の衛星の位置を、磁気緯度 (MLAT)、磁気経度 (MLON)、高度 (ALT)、磁気地方時 (MLT)、L 値 (L) で示してある。矢印 A、P は、遠地点、近地点を通過した時刻である。タイポールアンテナデータに重ねて描かれている破線は、IGRF 1975 モデルに基づいた局所電子シャイロ周波数の変化である。

Fig. 4 A typical example of frequency-time spectra for HF noise detected by two faraday cups and one dipole antenna. The DC components of electron current collected by the faraday cup are also displayed. The directivity of the faraday cup (A) is in the perpendicular direction to the geomagnetic line of force and the faraday cup (B)'s is in the parallel direction. The intensity scale for each channel is proportional to the logarithm of the power strength, with a range of about 50 dB from the base line of one channel to the base line of the next higher channel. The location of the satellite is given on the abscissa with the magnetic latitude (MLAT) and longitude (MLON) in degrees, the altitude (ALT) in km, the magnetic local time (MLT) in hours, and the L-value (L). Arrows A and P indicate the times of apogee and perigee, respectively. The broken line on the spectrum shows the variation of the electron gyrofrequency at the satellite location, calculated from the IGRF 1975 model.

Three typical noises are recognized, (1) the static noise, (2) the wide-band electric field noise, and (3) the narrow-band electric field noise.

## 2) 広帯域電界ノイズ

0050 UT から 0110 UT にかけてみられるように、北半球高緯度領域 (高度 2000–3500 km,  $L$  値 2 以上) では、ほとんどの周回で、ダイポールアンテナに 45 kHz から 3 MHz まで全周波数チャンネルを覆う広帯域な強い電界ノイズが入感する。ノイズパワーは、局所ジャイロ周波数近傍で少し押えられる傾向にあるが、ノイズ入感の空間的(時間的)広がりには、周波数による違いがほとんど認められない。

## 3) 狭帯域電界ノイズ

2330 UT から 0034 UT にかけて、衛星の移動に従うとみられる周波数シフトを伴った狭帯域電界ノイズが、ダイポールアンテナに入感している。入感位置や周波数は周回毎に異なっているが、周波数は一般的には局所ジャイロ周波数より高く、その変化はジャイロ周波数の変化と相関があるようである。

以上 3 つの典型ノイズは、初期観測 HF 帯データのほとんどすべてに共通な姿態であるが、今後、さらにデータを蓄積し解析を深め、ノイズの時間的空間的依存度を明白にし、発生過程の解明を行いたい。

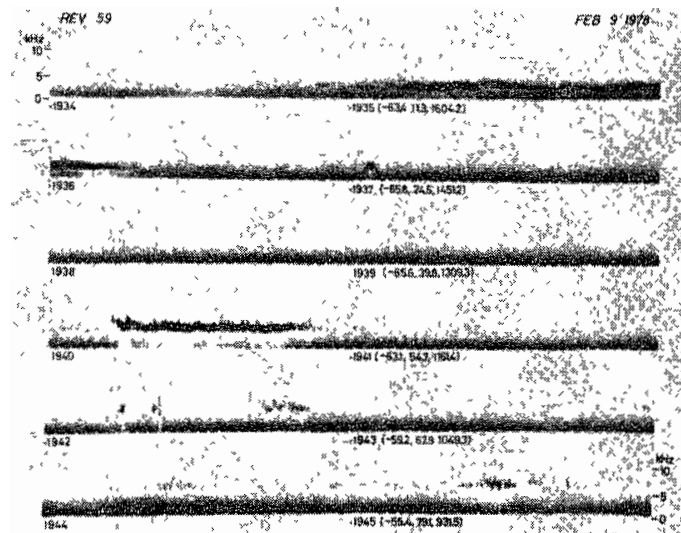


図 5 南極昭和基地でテレメトリ受信された、VLF 帯電界ノイズのスペクトル例。観測時刻の後のカッコ内は、衛星位置を緯度、経度、高度で示している。低域カットを受けたバント状エミッションが認められる。

Fig. 5 A typical example of frequency-time spectrum for VLF electric field noise observed over the Antarctic Syowa Station in summer season. Three parameters in the parentheses following the time show the satellite location with the latitude and longitude in degrees and the altitude in km.

The banded emissions with sharp lower cut are characteristic.

図5は、南極地域上空でのVLF帯電界ノイズのスペクトル例であり、南極昭和基地の地上局で1978年2月9日にテレメトリ受信して取得したものである。観測モードはVLFモードで、ダイポールアンテナをセンサーとしている。この時期の南半球は夏季に相当し、特異なノイズは認められないが、1935 UT から 1936 UT にかけてや、1940 UT から 1941 UT にかけて強いバンド状エミッションが入感している。さらに、エミッションのシャープな低域カット周波数が、衛星の移動にしたがって時間とともに徐々に上昇していく様子がよく認められるが、これは、衛星の高度変化に伴う  $f_{\text{LHR}}$  (lower hybrid resonance frequency) の変化に対応しているものと思われる。

今後、南半球が冬季となる時期にVLF帯観測の運用頻度を増やし、昭和基地におけるデータ取得に期待したい。

## 7. おわりに

本サブシステムによるプラズマ波動観測には、大きな特徴が二つある。第一は、センサーとしてダイポールアンテナとファラデーカップを用いていることである。両者の受信強度比を調べることにより、電磁波と静電波の区別とモード変換の可能性を検討することができよう。第二の特徴は、ファラデーカップ2個を、一つは磁力線の方向に、他はそれと直角の方向に向けて配置し、静電波の到来方向を決定しようとしていることである。これは世界ではじめての試みであり、EXOS-A衛星の特殊な姿勢制御方式によって可能となった。

南半球高緯度でのデータ取得が、ESWの、特にVLF帯観測の、主要な運用の一つとなるが、南極昭和基地におけるテレメトリ受信観測は、地上におけるいろいろな観測やロケット観測等との同時データ、他の極軌道衛星との近接データなどの多次元観測の要素をもつもので、大いに期待される。特に、約  $65.5^\circ$  という軌道傾斜角のため、昭和基地で得られるEXOS-Aの観測データは、現象の経度変化をとらえやすく、ISIS等他の極軌道衛星データとの比較は、興味が尽きない。

データの蓄積は、鹿児島宇宙空間観測所の主局、昭和基地の地上局ともに順調である。

最後に、EXOS-A衛星全体のシステムについての詳細は「科学衛星EXOS-A中間報告書」および「M-3H-2号機実験計画書(EXOS-A)」を参照されたい。

## 文 献

- GURNETT, D A and FRANK, L A (1977) A region of intense plasma wave turbulence on auroral field lines. *J Geophys Res*, **82**, 1031-1050

KELLEY, M. C (1977). Observations of paired electrostatic shocks in the polar magnetosphere Phys. Rev Lett., **38**, 292-295.

東京大学宇宙航空研究所科学衛星専門委員会第 35 研究班 (1977) 科学衛星 EXOS-A 中間報告書.

東京大学宇宙航空研究所 SES テータセンター (1978): M-3H-2 号機実験計画書 (EXOS-A)

(1978年6月10日受理)