

プラズマ波動及び波動励起観測実験
(PWS) による宇宙プラズマ波動観測

——あけぼの (EXOS-D) における PWS 観測装置と初期観測結果——

大家 寛¹⁾・森岡 昭¹⁾・小林 香¹⁾
飯島 雅英¹⁾・小野 高幸²⁾・宮岡 宏²⁾
岡田 敏美³⁾・小原 隆博⁴⁾

*PLASMA WAVE OBSERVATION AND STIMULATION
EXPERIMENTS (PWS) USING THE (EXOS-D) SATELLITE*

—Instrumentation and initial results including discovery
of the high altitude equatorial plasma turbulence—

By

Hiroshi OYA, Akira MORIOKA, Kaori KOBAYASHI,
Masahide IIZIMA, Takayuki ONO, Hiroshi MIYAOKA,
Toshimi OKADA and Takahiro OBARA

Abstract: The Plasma waves and sounder experiment (PWS) onboard the Akebono (EXOS-D) satellite have been successfully conducted after the deployment of the antenna and the turning on the instruments on March 4, 1989. In natural plasma wave observations, the dynamic spectra of the plasma waves in a whole range of the orbits are observed in the PWS frequency range from 20kHz to 5MHz. The results are summarized as follows.

i) The upper hybrid emissions that cover from the electron cyclotron frequency f_C to the upper hybrid frequency f_{UHR} for the case where f_C are higher than the local plasma frequency f_p , or cover from f_p to f_{UHR} for the case of $f_p > f_C$, are observed throughout whole path ranges of the satellite.

¹⁾ 東北大学理学部

²⁾ 国立極地研究所

³⁾ 名古屋大学空電研究所

⁴⁾ 宇宙科学研究所

From the global distribution of the upper hybrid frequency emissions, the structures of the plasmasphere are clarified.

ii) Auroral kilometric radiations are observed in the region associated with the auroral particle acceleration regions. The Polarization and Poynting vectors of AKR are also precisely measured. The data show the possibility for studies of the structure of the acceleration regions in addition to the generation mechanism of AKR. The AKR data that have been obtained in the acceleration region of the auroral particles are especially important suggesting the possible co-existence of the electrostatic plasma waves with the Z-mode waves.

iii) In the equatorial region of the plasmasphere the enhancement of the upper hybrid mode waves have been discovered; the enhancement shows two possible plasma turbulences, the first is the enhancement of the microscopic instabilities that are identified only as the enhancements of the intensity of the upper hybrid emissions and called "equatorial enhancement of the wave turbulence (EPWAT)"; the second is the enhancement of the irregular change of the upper hybrid frequency suggesting the turbulent variation of the plasma density called "equatorial enhancement of the density turbulence (EPDET)". EPWAT's are encircling the magnetic equator forming a disc within altitude range of 1000 km to 9000 km, while EPDET's encircle the geographic equator within altitude range of 1000 km to 9000 km forming another disc.

iv) Sounder experiments of the PWS have also been carried out; the results show the principal resonances such as plasma resonances at f_p , upper hybrid resonances at f_{UHR} , and harmonics of the electron cyclotron frequency at nf_C ($n=1, 2, 3, \dots$). The sequence of diffuse plasma resonances f_{Dn} with the static plasma wave resonance f_{Qn} are also detected even in a high altitude range higher than 3000 km. Very long ducted echoes of the sounder transmitting pulses have also been detected even at an altitude of 6000 km. All these results of the experiments reveal that the PWS/EXOS-D data are proving very promising key for the studies of the plasma and plasma waves through out the global ionosphere and plasmasphere, including the regions of auroral particle acceleration.

概 要

科学衛星あけぼの (EXOS-D) 衛星に搭載されたプラズマ波動及び波動励起観測実験 (PWS) 装置は、アンテナ伸展が行なわれた1989年3月以来、順調に観測を開始した。自然プラズマ波動の観測では、全軌道領域において 20 kHz から 5 MHz の周波数帯域のダイナミックスペクトラム観

測を行っている。その主要な結果は以下のとおりである。

i) 高域混成共鳴放射 (UHR 放射) があけぼの衛星の全軌道域において観測され、この放射の空間分布からプラズマ圏の構造が明らかにされた。

ii) オーロラ粒子加速域領域に関連してオーロラキロメートル放射 (AKR) が観測されている。この AKR の偏波とポインティングフラックスの計測も同時に行なわれている。これ等の観測データから AKR の放射メカニズム及びオーロラ粒子加速域の構造を研究することが可能となる。観測データは加速域において AKR 波動の成分として静電的プラズマ波動と Z-モード波動が共存していることを示している。

iii) プラズマ圏の赤道域において、高域混成共鳴 (UHR) 放射が強い強度をもって出現することが発見された。この放射の強度増大は2つの種類の擾乱を示唆している。即ち、第1は、EPWAT (Equatorial Enhancement of the Plasma Wave Turbulence) と名付けられた現象に対応し、高域混成共鳴放射の強度を増大させるマイクロなプラズマ不安定であり、第2は、EPDET (Equatorial Plasma Density Turbulence) と名付けられた現象に対応し、プラズマ密度の乱れに起因する高域混成共鳴放射時の不規則変化である。EPWAT 現象は高度 1,000 km から 9,000 km の磁気赤道域を disc 状にとりかこむものであり、一方 EPDET は高度 1,000 km から 9,000 km の領域の地理的赤道をもう1つ別の disc を形成して存在する。

iv) PWS のサウンダー実験も順調に成果を出しており、基本的なプラズマ共鳴である周波数 f_{UHR} における高域混成共鳴、周波数 nf_C ($n = 1, 2, 3, \dots$) における電子サイクロトロン高調波共鳴、及びプラズマ共鳴 ($f = f_p$) が観測されている。拡散型プラズマ共鳴系列である f_{Dn} もまた静電的プラズマ共鳴である f_{Qn} と伴に観測されている。この現象が観測される高度は 3,000 km 以上にも及んでいる。非常に長い継続時間をもつダクトエコーが、6,000 km の高度においても観測された。

これらすべての結果は、PWS データが、オーロラ粒子加速域に加えて、プラズマ圏、電離圏のすべての領域におけるプラズマ及びプラズマ波動の研究に極めて重要な貢献をするであろうことを約束している。

1. 序

1989年2月22日打ち上げられ、予定どおり、遠地点 10,570 km、近地点 275 km、軌道傾斜角 75° の準極軌道に入った EXOS-D は、オーロラ粒子の加速域を解明する目的をもって、1983年より6年にわたり準備されてきた。その内容は、EXOS-A, B, C と順を追って積み重ねられた我国の磁気圏プラズマ、粒子、波動、そして、オーロラ、観測の成果の上に立った、極めて完成度の高いものである。搭載された8つの観測器の一つに、EXOS-D ミッションの中核の一つと言っても良い、プラズマ波動観測器が搭載されている、この観測器は、EXOS-B, C とその性能を向上させ、ほとんど理想に近い構成をもって、観測に臨んでいる。

1989年3月4, 5日にかけて, 2組の Tip to tip 60 m のワイヤーアンテナ, 及び一辺 50 cm の三軸, ループの展開を終了し, 以来順調に観測を続けている。

本報告は, EXOS-D に搭載されている PWS システムの装置, 及び現在までに得られた観測データの紹介を目的としている。オーロラ粒子降下域での波動粒子相互作用過程にともなう, プラズマ波動の励起現象の他に, この PWS 装置の高感度でかつ, 高い周波数分解能をもつことを反映し, かつてどの衛星観測でも見られなかった, 現象を発見している。まず, 1,000 km 以上の高度で, 高域ハイブリッド共鳴周波数でのプラズマ波動の放射が常に, 継続していること, そしてそれが磁気赤道域及び, 地理的赤道域で, 惹き起されるプラズマの不安定に関連して増大する事が見い出された。

また, オーロラ域に流入する高エネルギー粒子が, 極域電離層のトップサイドより, ヘクトメートル波帯の電磁波を放射すること, しかもこの放射は, 局所的プラズマ波動 (UHR 周波数での) が, 電磁波に変換されて放射されるもので, 木星のデカメータ波に対応していることが明らかになった。

「あけぼの (EXOS-D)」衛星が曹遇したもう一つの大きな出来事は, 太陽観測史最大の活動度をもつフレア, 及び地磁気嵐の発生時に観測に入ったことである。プラズマ・ポーズの大崩壊が, 同じく, 高域ハイブリッド周波数から見い出されたり, またこの大きな, プラズマ擾乱を介して, 局所的静電的プラズマ波動が, 電磁波に変換されるプロセスが実証された。

宇宙空間における, 高周波プラズマ波動の研究分野では, オーロラキロメートル電波放射 [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14] の研究を含め, IMP, GEOS, Hawkeye, Isis-1, Exos-B そして DE の諸衛星が, 大きく貢献してきている。一方, こうした自然のプラズマ波動の観測研究に並行して, 電波による能動的実験では, 最初のロケット実験による準備につづき, Alouette, 1, 2 及び ISIS-1 衛星 [15], [16], [17], [18], [19], [20] による初期の諸観測が進められてきている。

こうした流れの中で, さらにプラズマ波動観測は一連の新しい衛星群として, じきけん (EXOS-B) [21], [14] さらにおおぞら (EXOS-C) [22], [23] によって高い周波数分解能の観測があり, さらには, プラズマ波動励起実験の新しい精度の高い方式をもって, 新発見, そして物理上の謎の究明に貢献してきた。あけぼの (EXOS-D) の観測は, こうした研究において最も新しいものを付け加え従来提出された, 謎の解明にとりかかる意義をもっている。

そこで本論文においてはまず2節で, 観測装置の内容を, 3節では, 自然プラズマ波動と, プラズマ密度計測を, そして4節ではプラズマ波動の電磁波への変換にかかわる観測事実を, そして, 第5節には, プラズマ波動励起実験データの紹介を, 行う。そして第6節では結論をのべる。

2. PWS・システム及び観測装置

2.1 システム 構成

PWS システムは, プラズマ波動観測器としては, 最も総合された, システムと言うことができ, 自然プラズマ波動観測部 (Natural Plasma Wave-NPW), プラズマ波動能動実験部 (Stimulated Plasma Wave-SPW) 及び, 電子数密度計測部, (Number Density of Electron-

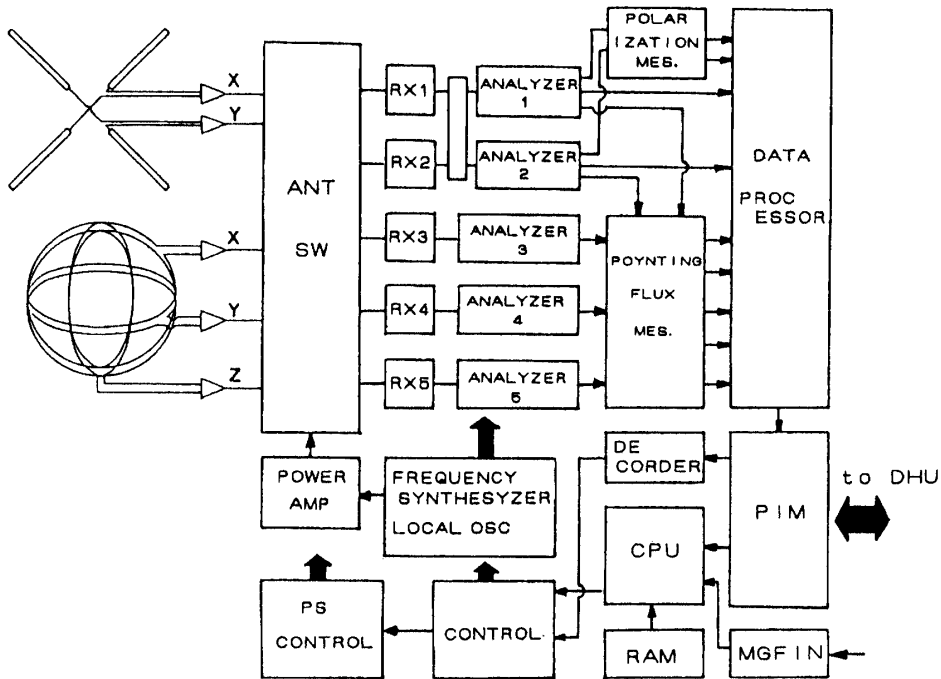


図1 PWSシステムのプロックダイアグラム。プラズマ波動の信号はダイポールアンテナ(X, Y)及びループアンテナ(X, Y, Z)によってピックアップされる。PWSシステムで処理されたデータはデータハンドリングユニット(DHU)へ送られる。

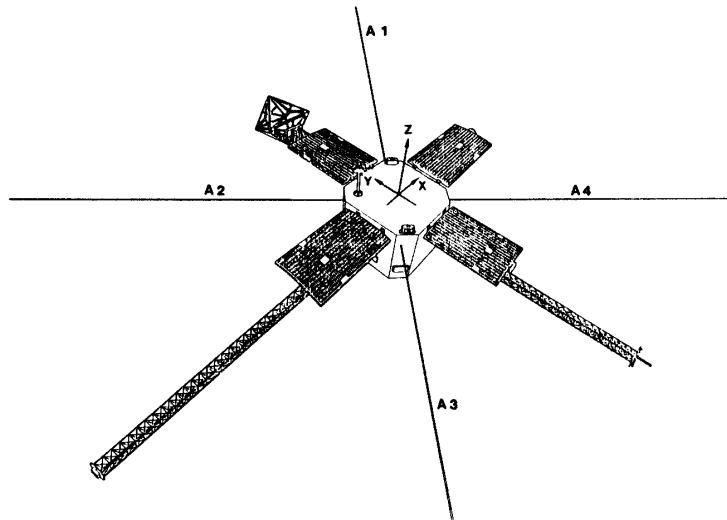


図2 直交する2つのダイポールアンテナ及び3次元ループアンテナ。ダイポールアンテナのA1—A3, およびA2—A4はそれぞれ衛星X軸からY軸方向に45°, Y軸から-X軸方向に45°回転した方向に展張される。ループアンテナの3軸 H_x , H_y , H_z は衛星のX, Y, Z座標系と固有の関係を持つ。

NEI) の各サブシステムより成る。これらのサブシステムはさらに、多くの機能を備えるが、その構成は第1表 (Table 1) に示すとおりとなる。

まず NPW 部はさらに、周波スペクトル観測部 (Spectra)、偏波観測部 (Polarizations) 及び、ポインティング・フラックス計測部 (Poyinting Fluxes) より成る。

これらの構成をうらずける機器構成図を第1図に示す。特に 60 m tip to tip の2組のワイヤーアンテナは、プラズマ波動の電場成分計測と、SPW・オペレーションでは、一対は、プラズマ波動励起用に使われる。一方、磁場成分は、一辺 60 cm 正方形面3軸、直交成分を計測するループアンテナ [24] によって計測される。第2図に、あけぼの (EXOS-D) 衛星と、ワイヤーアンテナ、及びループアンテナの位置関係を示すための見取り図を示した。

2.2 NPW システム

自然プラズマ波動の電場及び磁場に関する計測を行うシステムで、第1図に示す全システムのうち、Power Amp 系のオペレーションを休止した形で、実行する。NPW のオペレーションは、すでにのべたように、Spectra, Polarization 及び Poyinting Fluxes の三つのオペレーションをもつ。

i) Spectra

Frequency Synthesizer に対する Local Oscillator Frequency を選択し、20 kHz-5MHz までを 1 sec (Fast Mode) 8 sec (Medium Mode) で解析する。その検出感度は高感度では

Table 1 System, Subsystems and Operation Modes

System	Subsystems	Operation Modes	Frequency	Time Resolution		
PWS	NPW	Spectra	Sweep	20 kHz-5 MHz	1 sec	
			Fix	8 points	0.25 sec	
		Polarizations	Sweep	20 kHz-5 MHz	1 sec	
			Fix	8 points	0.25 sec	
		Poynting Fluxes	Fix	8 points	0.25 sec	
		SPW	Sweep	Normal	H-band	0.3-11 MHz
	L-band				20-900 kHz	16 sec
	Ne-Track		F_{UHR}	$F_0 + 60$ kHz	1 sec	
			F_p	20-170 kHz	1 sec	
	Fix		8 points	62.5 msec		
NEI	Sweep		20kHz-5MHz	1 sec		
		Fix	8 points	0.25 sec		

0.08 $\mu\text{v}/\text{m}$, 低感度では10 $\mu\text{v}/\text{m}$ となっている。またこの Analyzer は、第2表 (Table 2) に示す8つの固定周波数でも分析される。この場合、極めて時間分解能が上がる。つまり各周波数0.25 sec づつ切換つつ連続観測をすることになる。

ii) Polarization

第1図に示す Analyzer 系のうち RX-1, RX-2 系統を使い、直交するダイポールアンテナ系との位相差計測を行って、到来する電波の偏波計測を実施する。

まず、各系統 RX-1~RX-5 までの内容は、第3図に示されるが、これらを使って、偏波計測する場合のダイポール・アンテナとの接続、及び R, L 偏波成分検出のための、位相関係を第4図に示す。なお、第4図での Bridge 部は、第3図で 1st IF 部に、詳しく示されている。飛翔前試験では、R と L は 28 dB 以上の分離が実証されている。

iii) Poynting Fluxes Vector 計測

電磁波の伝播モードを明らかにしようとする時、その電波の伝播方向つまり、ポインティング・ベクトルを明らかにすることは、不可欠である。その点、これらの計測をはじめて可能にした、EXOS-D では、特徴ある部分の一つである。

Poynting 計測の方法は、入力信号の位相を、充分校正した形で維持しつつ、生のデータ

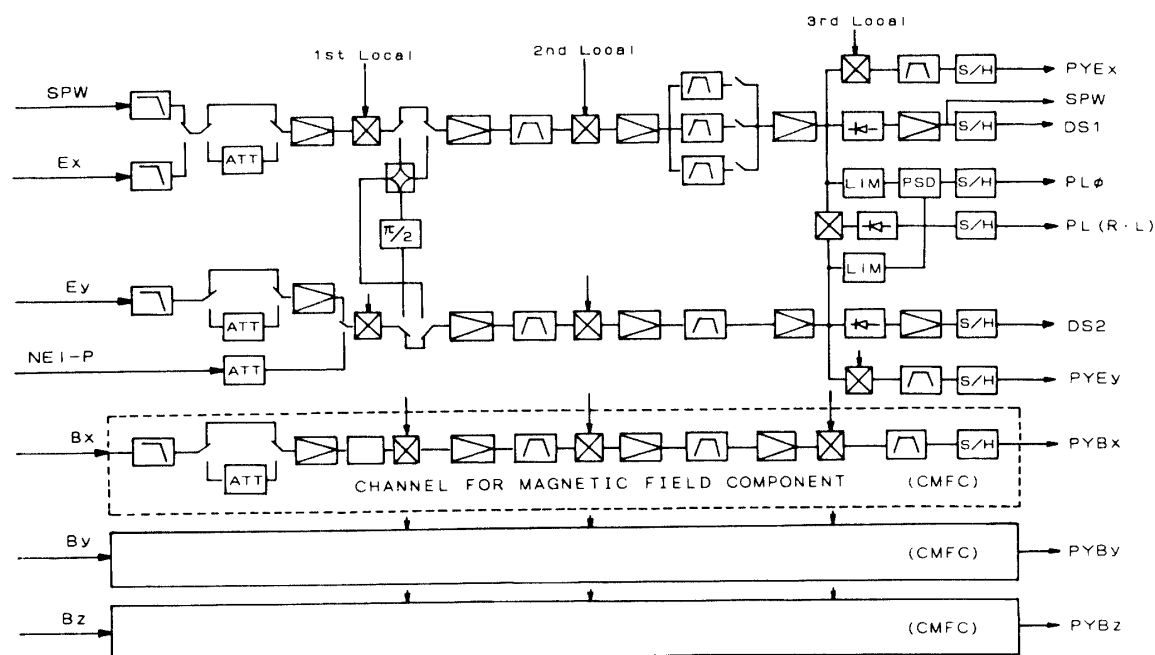


図3 受信機システムのブロックダイヤグラム・5系統のダブルスーパーヘテロダイン受信機は7つの観測モード(第1表参照)に対応して3種の基本動作をする。すなわち、NPWモードとして電界2成分、磁界3成分、SPWモードとして電界X成分、そしてインピーダンスプローブモードである。またポインティング計測のために、第2IF段の出力信号は第3ローカル周波数とミキシングされ1KHz信号に変換される。そしてPYEx, PYEy, PYBx, PYByおよびPYBzの成分からポインティングベクトルを計算によって求めることができる。DS1およびDS2はそれぞれExおよびEy成分のダイナミックスpekトル出力である。これらは検波された後、時定数0.01秒で積分され、サンプルホールドされる。

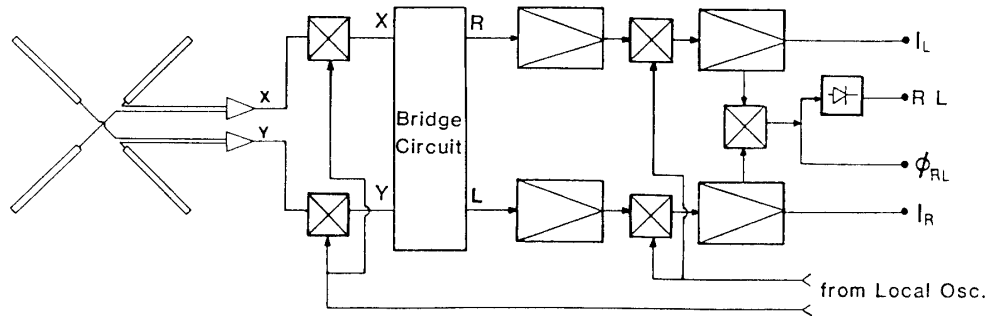


図4 左旋波および右旋波を分離するためサブシステムのブロックダイアグラム。

Table 2 Fixed Frequencies

Code	Frequency
Fix 1	59.3 kHz
Fix 2	81.5 kHz
Fix 3	137.1 kHz
Fix 4	181.5 kHz
Fix 5	259.4 kHz
Fix 6	371.3 kHz
Fix 7	593.7 kHz
Fix 8	1358.1 kHz

を Sample することにある。このため、第2表 (Table 2) に示す8つの固定周波数に対し、二つのダイポール系、三つのループ系の受信信号を十分に位相を保持したまま、1kHzの第三中間周波数 (第1図参照) まで、変換し、ここで、正確な、信号のA-D変換を行う。

この結果を地上に伝送し

$$\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (1)$$

にしたがって、ポインティングベクトルを求める。この際、各成分、すなわち

$$\left. \begin{aligned} P_x &= E_y H_z - E_z H_y \\ P_y &= E_z H_x - E_x H_z \\ P_z &= E_x H_y - E_y H_x \end{aligned} \right\} (2)$$

を算出するに際し、(x, y, z)系を衛星に準拠し、(x, A-アンテナ系, y, B-アンテナ系, z, 衛星スピン軸)として求め、さらに、他の座標系すなわち、磁力線あるいは、地球に基準をおく座標系等に、座標変換する方式をとる。

衛星に準拠する、電磁場の計測に際しては、z軸アンテナをもっていないが、電磁場に関

する基本式

$$\text{rot } \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t \quad (3)$$

による。いま、観測している電磁場の位相が、

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \vec{F}_0 \exp \{ i (\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}) \} \\ \vec{H} &= \vec{H}_0 \exp \{ i (\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}) \} \end{aligned} \quad (4)$$

で表現される時、(3)式から

$$\vec{k} \times \vec{E} = \omega \mu_0 \vec{H}$$

が結果するが、この関係は、とりもなおさず、Hz・成分が存在するような電磁波であるかぎり

$$\vec{E} \cdot \vec{H} = 0 \quad (5)$$

すなわち、

$$E_z = - (H_x E_x + H_y E_y) / H_z \quad (6)$$

として求めうる。(この計測については、本特集号及び[25]に別論文として掲載されている)。

2.3 SPW システム

SPW システムでは、二つのアンテナ系のうち、A1-A2系を高周波送信に、そしてA3-A4系を、受信系アンテナとして働かせる。非常の場合は、このアンテナの送受の役割を切り換えることが可能になる。

送信系アンテナには、High Powerで、最大600 Watt Low Powerで最大60 Wattの送信能力をもつPower Ampより、20 kHz—11 MHzの高周波電界が、印加される。の高周波電界の周波数選択は、目的に応じ、多様なモードのオペレーションを可能にしている。

このモードは、第1表 (Table 1) に示されているが、まず、SweepとFixで、掃引か、固定の別を選択しうるFixは第2表 (Table 2) に示す8つの固定周波数から選択される。Sweepモードでは通常の単調な周波数変化、すなわち、高周波帯では、300 kHzから11 MHzそして低周波帯では20 kHz—900 kHzをそれぞれ32 sec及び、16 secで掃引する。

さらに、オペレーション上、特徴をもつのは、Ne-Tracking modeである。これは内容はUpper hybrid周波数の近傍を詳細に掃引するモードと、局所プラズマ周波数を探索するモードがある。前者は、F_{UHR}モードと称し、掃引の起点を計測された電子サイクロトロン周波数におき、そこから、1sec間に60 kHz巾の掃引を行う。この場合、通常掃引モードのように、帯域巾を10 kHzにはせず、自然プラズマ波動観測と同じ、1kHzの狭帯域を選択する。Fpモードも同じ考え方に立っているが、高い高度の、オーロラ粒子加速域での観測を主体としていて20 kHzから、170 kHzまでを、帯域巾1kHzで、1sec間に掃引する。

SPWでの高周波電界の印加は、100μsec巾のパルスで、そのレスポンスを62.5 msec間

にわたって、計測する。この方式そのものは、すでに Alouette1, 2 ISIS, 1, 2号衛星によって、実験が行なわれたものであるが、当初計画では、電離層トップサイドサウンダーをめざしていた。これらの衛星観測の所期の結果は、めざした通りに得られたが、さらに、この当初計画を大巾に上まわる、新発見があった。すなわち、高周波電界は、衛星周辺に、ESCH 波 (Electrostatic Cyclotron Harmonic Plasma Wave) を励起していたのである。この ESCH 波はさらにその後、プラズマ不安定現象により励起されることが判明し、[38], [39] トップサイド・サウンダーは、プラズマ波動励起による。宇宙空間プラズマの能動実験手段の一つであることが、認識されるようになった。我国では、こうした方向を、育てるため、ロケット実験を繰り返し、そして、EXOS-B, EXOS-C の実験を成功させている。こうした流れの中であって、さらに一層高度な機能をもたしたのが、今回、あけぼの (EXOS-D) に搭載された、SPW システムである。

2. 4 NEI システム

独立に電子数密度計測を目的として、周波数掃引片インピーダンスプローブを搭載している。これは1964年以來、我国で独自に開発された高精度電子密度計測器として、ロケット実験での多数の観測実績[26]をもった後、でんぱ (REX) たいよう (SRATS) [27], [28], じきけん (EXOS-B), ひのとり (ASTRO-A) [29], [30], おおぞら (EXOS-C) [31]で多くの実績をもち、あけぼの (EXOS-D) においても衛星飛翔中の局所プラズマ密度の基本計測手段として、周波数掃引型インピーダンス・プローブを搭載することとなった。

観測段階に入ると、しかし、予想に反し、自然の高域、ハイブリッド周波数における、プラズマ波放射が、観測可能となり、インピーダンス、プローブは、当面、この放射がない1,000 km 以下での電離層 Topside での計測の役割にまわっている。うれしい誤算となっている。

3. 初期段階の観測結果

3. 1 概要

1989年3月4日におけるダイポーアンテナの伸展及び3月6日におけるループアンテナの展開の後、自然プラズマ波動の観測が開始された。また3月29日に行なわれた高周波放射パワーアンプの動作試験の後、サウンダーモードの運用も開始された。

自然プラズマ波動 (NPW) の観測からは、i) upper hybrid resonance エミッションの広域にわたる出現、ii) 太陽タイプIII電波バースト、iii) 静電的ホイッスラーモード波に係る逆ランダウ型不安定、iv) オーロラキロメトリック放射、v) VLF ヒス・エミッション、vi) 強い LHR 波放射、及びvii) 地球ヘクトメトリック放射、が検出され解析が進められている。またプラズマ波動励起実験から、i) 電子サイクロトロン共鳴及びその高調波成分、ii) upper hybrid 共鳴放射、iii) プラズマ共鳴、及びiv) diffuse resonance 現象が検出されている。トップサイドサウンダーの機能としては、6,000 km の高度においてもダクトエコーがキャッチされ十分な性能を発揮している。

3. 2 Upper hybrid (UHR) エミッション

第5図(37頁)に典型例を示すように upper hybrid UHR エミッションが高度 1,000 km 以上の“あけぼの衛星”軌道全域において観測される。この周波数から衛星軌道に沿ったプラズマ密度を容易に求めることができる。この upper hybrid 共鳴放射の強度は 1.5×10^{-7} volt/m から、NPW 観測モードの受信機の飽和強度にまで至る。

(a) Plasmopause 構造

観測される upper hybrid 共鳴エミッションからは、3,000 km から 10,000 km にわたる高度域での Plasmopause の構造を知ることができる。すなわち ($f_{\text{UHR}} = \sqrt{f_p^2 + f_c^2}$ より既知の f_c を使って) f_p を求め、ここから電子密度を求める。いま、第6図(37頁)には、UHR 放射と求められた電子密度プロファイルを示す。観測結果は、以下の3つのタイプに分類することができる。すなわち、

- i) gradual タイプ (G-型)
- ii) sharp タイプ (S-型)
- iii) irregular タイプ (I-型) となるが、

これらのタイプの典型例を第7図(a)から第7図(c)に示す(38頁)。irregular タイプの plasmopause は更に次の3つの形状をもつ。すなわち

- i) detached plasma タイプ (I_D -型)
- ii) large oscillatory タイプ (I_O -型)
- iii) multi shock タイプ (I_S -型) であり、

これら3つの典型例を第8図(a)–(c)に示す(39頁)。detached タイプの構造は通常、プラズマ密度の急激な変化を伴う。large oscillatory タイプは plasmopause の大規模な擾乱を示しており、sharp タイプの1変形を理解される。これ等 upper hybrid 共鳴エミッションから求められた plasmopause 構造及びそのダイナミクスに関して、詳細な研究が今後の課題となっている。

(b) 赤道域におけるプラズマ擾乱

自然プラズマ波動のダイナミックスpektrumの中に赤道上空において顕著な upper hybrid 共鳴エミッションの強度の増大する現象が発見された。この赤道域プラズマ擾乱は2つの明瞭なタイプに分けられる。その1つは、第9図(a)及び(b)に示す(40頁)ごとく、upper hybrid 共鳴周波数が変化するタイプである。周波数変化は時に系統的な振動を示し、また急激な落ち込みやステップ状変化、更には非常に不規則な振動を示すことがある。この upper hybrid 共鳴周波数の変化はプラズマ密度の変動を表わしていることになる。したがってこの種の擾乱は赤道プラズマ密度擾乱として理解され、もう1つタイプの擾乱は、upper hybrid 共鳴エミッションの周波数の変化を伴わずにそのエミッションの強度が増大するタイプである。その典型例を第10図(a)及び(b)に示す(40頁)。この種のエミッション擾乱は、磁力線に対して直角にドリフト運動するエネルギー粒子によってもたらされる自由エネルギーの供給、又は、bi-Maxellian プラズマ分布の温度異方性の増大があったことを示唆している。これら2つのタイプの現象を区別するために、前者のタイプを“Equatorial Plasma Density Turbulence (EPDET)”，第2のタイプを“Equatorial Enhancement of the Plasma Wave Turbulence (EPWAT)”と名付けた。PWSの観測開始後4ヵ月のデータを

基に、EPDET と EPWAT 現象の出現領域特性及び地磁気擾乱との関係について以下に述べる。

i) 出現領域

EPDET と EPWAT の出現領域についての統計解析結果を第 11 図(a)(b)及び第 12 図(a)(b)に示す。解析期間は 1989 年 3 月より 9 月に限られるが、この期間において衛星が通過した local time (10 時～24 時) 及び高度範囲 (1,000 km～9,000 km) にわたって、EPDET は地理的赤道、EPWAT は磁氣的赤道にその出現の中心をもつ。すなわち、EPDET 現象を生じさせるプラズマ波動擾乱は地球の地理的赤道を取り巻くディスク状領域に発生し、EPWAT は地磁気赤道を取り巻くディスク状領域に発生することが明らかにされた。この解析結果から、EPDET 現象は、地球の重力及び遠心力に関係した運動エネルギーに強く支配されていることを示している。一方、EPWAT は明らかに電磁的作用がその発生に強く係わっていることを示している。

ii) 地磁気活動との相関

EPWAT 現象について、その強度と地磁気活動度指数 ΣK_p との相関解析が行なわれた。第 13 図に示すごとく、EPWAT の強度と ΣK_p の大きさとは相関が存在することが示された。このことは EPWAT 現象は、磁気圏からのエネルギー流入と密接な関係があることを意味している。しかし一方には地磁気活動度とは相関を持たない成分も存在するが、これは、EPWAT 現象は太陽風と磁気圏の相互作用に起因するエネルギー流入をエネルギー源とするのみではなく、磁気赤道における電磁氣的条件によってもまた支配されることを示唆している。

3. 3 AKR

オーロラキロメトリック電波放射 (AKR) 現象は、プラズマ圏の外側領域において、非常に頻繁に観測される。AKR の発生域と衛星の相対的な位置関係によって、AKR のダイナミックスペクトラムはさまざまな様相を示すが、特に衛星が AKR の発生域の中に位置するときのスペクトラムは、AKR の発生とオーロラ粒子加速域の関係を研究する上で重要である。観測される AKR の周波数は、AKR が発生している場所での電子サイクロトロン周波数を示していると仮定することにより、AKR のダイナミックスペクトラムからオーロラ粒子加速域の空間分布を知ることが可能となる。

AKR の強度と継続時間から AKR 現象 5 つの強度に分類して見ることにした。最も弱い放射 (第 14 図 (41 頁) (a)参照) の場合、AKR スペクトラムは、衛星の高度 9,000 km から、その下方 2,000 km までの高度領域に対応して、80 kHz から 780 kHz の周波数成分をもつ、AKR 強度がやや大きくなった第 14 図(b)の場合は、約 5 分の特性時間をもって AKR は 3 つの周波数帯で出現するが、これはそれぞれ 3 つの加速域に対応しているものと考えられる。第 1 の source 域は、衛星近傍の UHR 周波数 (upper hybrid 共鳴周波数) と AKR のカットオフ周波数が一致することから、ほぼ衛星高度に等しい高度 10,000 km のレベルに存在すると考えられる。第 2 の source 域は、AKR の周波数帯域 (220 kHz～540 kHz) に対応して高度 6,000～3,000 km にあると同定される。周波数帯域 700 kHz から 1,100 kHz をもつ第 3 の AKR の source 域は、高度 800 km～1,500 km に位置すると考えられる。AKR の

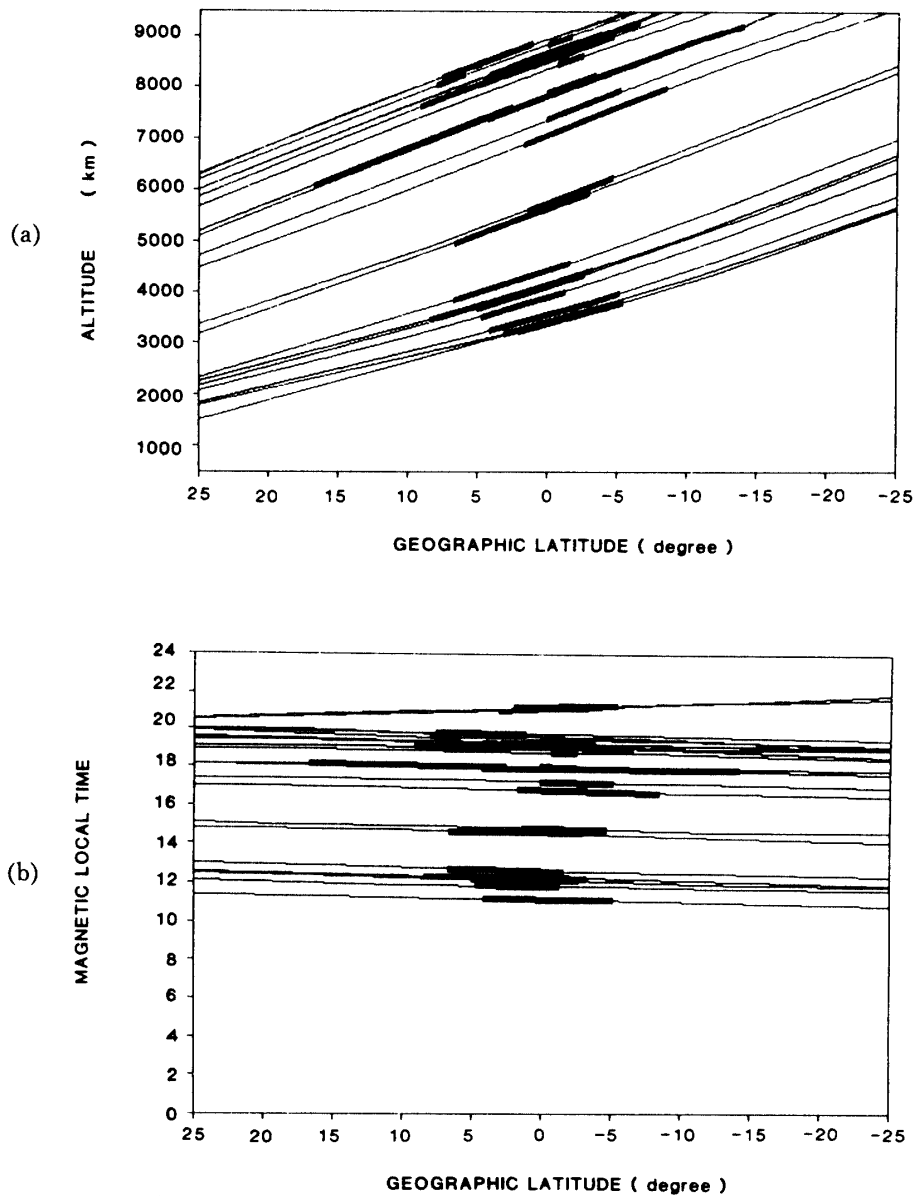


図11 EPDET現象の出現領域の統計結果

- (a) 地理緯度と高度に対する出現域分布. 細線で示される軌道域(観測開始より7月1日までのデータによる)に対してEPWATが観測された領域を太い線で示す. 結果は, 2000kmから9000kmの高度域において地理的赤道を中心とした領域にEPDET現象が出現することを示している.
- (b) 磁気地方時対地理的緯度ダイアグラムにおけるEPDET出現領域. EPDETの出現は統計が行なわれた10時~22時の範囲内で, 磁気地方時依存性をもたないことが示される.

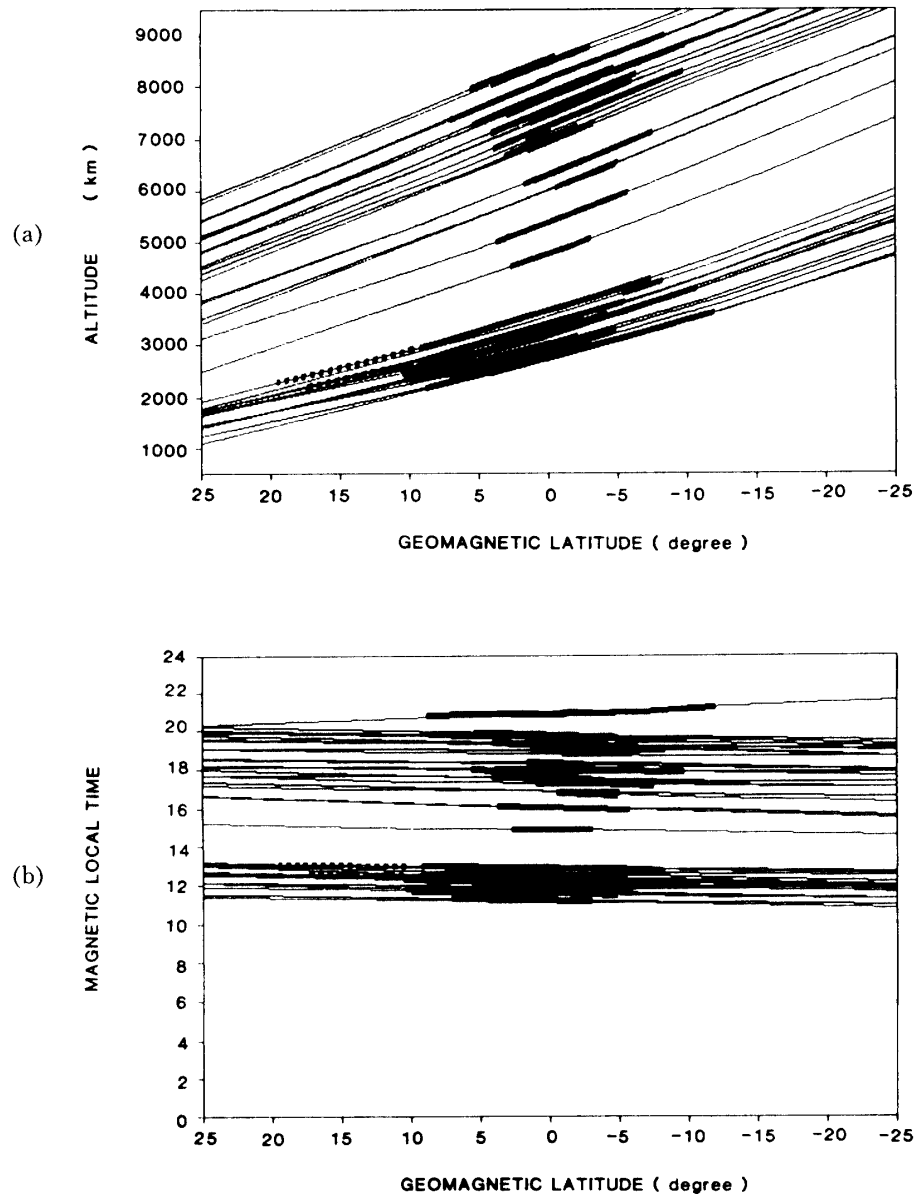


図12 EPWAT現象の出現領域の統計結果.

- (a) 高度対地磁気座標ダイアグラムにおけるEPWAT出現特性. 太線部がEPWATの出現域を示す. EPWATは、高度2000kmから8500kmのすべての高度領域において、地磁気赤道を中心とした赤道帯で出現することを示している.
- (b) 磁気地方時対地磁気緯度ダイアグラムにおけるEPWAT出現特性. EPWATは、地磁気赤道を中心とした領域において、統計が行われた10時~22時の範囲ですべての磁気地方時に出現することを示している.

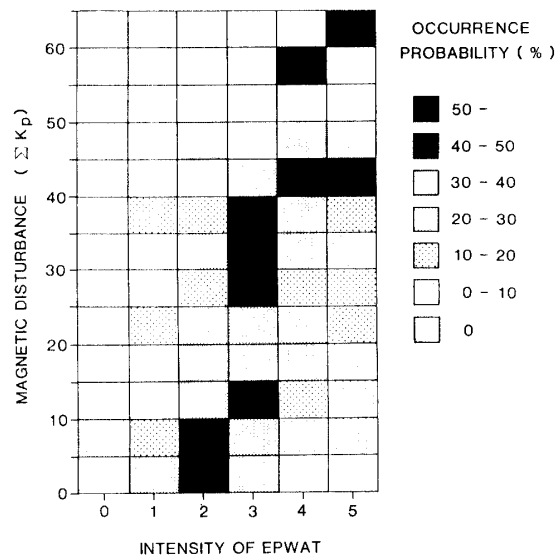


図13 EPWAT現象の地磁気擾乱との相関特性. 地磁気擾乱指数, ΣK (柿岡地磁気観測所) 値に対する5段階に分けられたEPWAT分布のダイアグラム. ΣK 値が大きい程, 強度が大きいEPWAT分布が出現することが示される.

source 領域がいくつかのグループに分布する傾向は, 第14図(c)及び(d)に示す. より強度の強いAKRの場合に顕著となる.

最大級の強度をもつAKRのスペクトルを第14図(e)に示す. AKRの強度が大きいとき, そのスペクトラムの中に微細構造が顕著となる. この微細構造は, 互いに50~200 km離れた細かい加速域が大規模な加速域の中に生じていることを示している. またこの微細構造は非常に速く変動することを示し, この加速域のダイナミクスに係る情報をもったAKR微細構造の研究は今後重点的に行う研究課題の1つとなっている.

3.4 ホイッスラーモード波放射

ホイッスラーモード波の放射は, オーロラ域やカスプ域においてエネルギー粒子の降下に伴って非常に頻繁に観測される. このホイッスラーモード波は電磁波の性質をもったものと, 静電波の性質をもったものの2つに大別される. 第15図(43頁)(a)には, 第5図と同じフォーマットで, ダイナミックスペクトラムを示す. ここには省略するがこの現象は, 電界成分と磁界成分との両成分をもつ電磁波的ホイッスラーモード波である. しかし08:29 UTから08:34 UTに観測されたホイッスラーモード波は全く磁界成分を伴っていないことが示される. この種のホイッスラー波は, サイクロトロン相互作用ではなく, 逆ランダウ過程で生じた静電波モードホイッスラー波と同定される. 第15図(b)には, ホイッスラー波放射がオーロラ帯から極冠帯において観測された例を示す. ここで見られる広帯域ホイッスラー波は沿磁力線電流と良い相関を示し[32], オーロラ域の粒子降下と密接に関係していることをあらわしている.

4. 波動モード変換過程

静電波と電磁波がUHR波のチャンネルを介して結合している[33]ことから、静電的プラズマ波動が電磁波へとモード変換するプロセスが宇宙における電磁放射の重要な部分を占めるという理論[34]が提唱された。地球プラズマポーズで放射される continuum 放射はこのモード変換のプロセスによって説明[35]、[36]されている。EXOS-A による PWS の観測からは、プラズマポーズ、プラズマ分布の擾乱域、更に極域トップサイド電離層等の領域で、モード変換が生じている直接の場面が実証的にとらえられている。

4.1 モード変換プロセスの直接観測

第16図(44頁)にモード変換が生じている典型的な例を示す。1989年3月24日06:24 UTにおいて、明瞭な電波放射が、160 kHz、260 kHz、340 kHz 及び440 kHz 付近に認められることができる。160 kHz 近傍のバンドは10分間程継続し、衛星が、160 kHz の電磁波と同じ周波数のUHR放射域にさしかかった点を起点としている。一方260 kHz のバンドは、衛星が06:55 UTにプラズマ圏内の乱れたプラズマ分布を示す点に突入するまでの約30分間継続する。そこでのUHR周波数が源となっていて260 kHz の放射電磁波と一致する。第3のバンドである340 kHz の電磁波は07:00 UTに、また第4の440 kHz バンドは07:02 UTにそれぞれその場のUHR周波数と一致する点を起点としている。07:00 UTから07:23 UTにかけては非常に大きなプラズマ不規則分布が生じているが、こうした領域で、実効的に静電的プラズマ波動から電磁波へと変換が生じることを、まさに実証していることになる。

4.2 地球ヘクトメトリック放射

極域電離層から放射される地球ヘクトメトリック放射(THR)は、EXOS-C衛星による観測から発見[22]された。しかしEXOS-C衛星の遠地点高度が低かったことから、このヘクトメトリック放射が自由空間へと向って伝搬している事実は確認されていなかった。一方EXOS-A衛星の遠地点高度(10,500 km)は充分高いことから、地球の外へ向って放射されているTHRの様相を極めて明瞭にとらえることができた。第17図(44頁)に700 kHz から3.2 MHzにかけての周波数帯で生じているTHRの典型例を示す。放射周波数は、遠方の昼側電離層のプラズマ周波数によって縁取られているが、これは昼側電離層のシルエットを見ているとすることができる。

5. SPW, プラズマ波動励起実験の成果

1989年3月29日に行なわれた高周波電力増巾部の動作確認テストの後、PWS サウンダーモードの運用は順調に進められてきた。このサウンダー実験は、衛星の遠地点高度である10,500 kmに至るまでのあらゆる高度領域で実行されている。EXOS-B衛星によるサウンダー実験は、30,050 kmの高高度域まで行なわれたが、パワーアンプの実効出力電力は非常に小さかった。そのためEXOS-D衛星によるサウンダー観測では、パワーアンプの性能の向上が計られ、プラズマ波動励起及び電離層・プラズマ圏プラズマ探測に十分な機器性能

が得られている。

5. 1 典型的イオノグラム

トップサイド電離層で行うサウンダー観測では、電離層からのエコーが所期のとおり得られている。第18(45頁)(a), (b)図に、高度1,942 km及び5,665 kmのトップサイド電離層で得られたイオノグラムを示す。これ等の結果は、過去に、Alouette 1, 2号 ISIS 1, 2号及びEXOS-Cで得られた成果[37]と同様であるが、EXOS-Dによる観測は、オーロラ粒子加速域の生成に関連する領域でプラズマ分布を明らかにしたりプラズマ波動の能動的な波動粒子相互作用を解明する点で、新発見が、期待される。

プラズマ圏にダクトが存在するとき、パルスエコーは非常に長距離伝播可能となる。第18図の(b)に示すように、5,000 kmの高度で得られたイオノグラムは、ダクトエコーが非常に遠距離伝搬してきていることを示している。

5. 2 diffuse plasma resonance 系列

高高度域において、非常に継続時間の長い系列的 diffuse plasma resonance が観測された。第19図(46頁)(a), (b)にその典型例を示す。系列的 diffuse plasma resonance は、本論文の著者の一人[38], [39]によって最初に発見されたものであるが、この波動が静電的プラズマ共鳴と特殊な関係をもつことからこの2つの波の非線型相互作用が励起機構を示すものであることが認識された[39]。

プラズマ中に高周波の高電力パルスを印加することによって励起されるプラズマ不安定が最近提唱[40], [41], [42]されているが、EXOS-Dによる実験結果は更にこの分野の研究に重要なデータを提供しつつある。

6. 結 論

あけぼの(EXOS-D)衛星に搭載のPWS(Plasma Waves and Sounder Experiment)装置は、2組の60 mアンテナの伸展及び60 cm×60 cm面をもつ3軸ループアンテナの展開の後、自然プラズマ波動観測を計画どおり順調に行なっている。又能動的プラズマ波観測のための高周波の高電力増巾器の動作開始以後は、プラズマ波動励起及びトップサイドサウンダー観測を行う能動実験も極めて順調に進められている。機器は、自然プラズマ波動観測においては20 kHzから5 MHzの広い周波数領域を、サウンダーモード観測においては20 kHzから11 MHzまでの広帯域の観測を基本としている。

自然プラズマ波動観測(NPW)は、電磁界のダイナミックスペクトル観測、偏波計測及びポインティングフラックス計測を行う。サウンダーモードの観測は多様な運用モードをそなえている。すなわち、i) 周波数300 kHz-11 MHzの高周波モード、ii) 周波数20 kHz-800 kHzの低周波モード、iii) 希薄なプラズマで行う F_{UHR} モード、iv) 濃いプラズマ中で行う F_p モード及びv) 高時間分解能の固定8波モードとからなる。

自然プラズマ波動観測の成果を要約すると、まずその1つはハイブリッドモード波動が衛星の軌道に沿って常に生じていることを示した点にある。この観測されるUHR周波数から軌道に沿ってのプラズマ密度を得ることができる。そしてプラズマ圏の様々な様相が、

UHR 周波数のグローバルな分布の観測から得られた。プラズマポーズの構造は、i) G型(緩変化型)、ii) S型(急変化型)及びiii) I型(不規則変化型)の3つに分類される。I型プラズマポーズ構造は更に、a) 分離プラズマ型(ID型)、b) 大振動型(Io型)及びマルチショック型(Is型)に細分される。

高域ハイブリッドモード、プラズマ波動は、i) オーロラ粒子降下域、ii) 磁気赤道域、そしてiii) トラフ域の高エネルギー粒子の散発的降下に対応して、強く励起される。特に、赤道域の高域ハイブリッドモード・プラズマ波動の励起は、従来全く知られていなかったもので EXOS-D によってもたらされた、新発見である。この高域ハイブリッドモード・プラズマ波動の励起は、プラズマ不安定に起因するもので、厳密には、Equatorial Plasma Wave Turbulence (EPWAT) と密度ゆらぎを示す Equatorial Plasma Density Turbulence (EPDET) に分けられる。EPWAT は、磁気赤道を中心に、生ずるのに対し、EPDET は、地理的赤道に生じている。これらの擾乱の発生は、 Σ_{kp} が非常に大きくなると極めて強まり、磁気嵐にともなって、太陽風からのエネルギー注入に呼応しているが、一方、全く磁気擾乱のない場合も、存在していて、その原因が地球の重力、自転及び、赤道域の磁場と重力ベクトル間の直交性等、ダイナミックを支配する、内在的要因によっている事も示している。土星の環のように高度 1,000 km ~ 10,000 km にわたって赤道域をとりまくこの擾乱域の存在の発見はその成因の解明が待たれている。

オーロラキロメートル、電波放射については、あらゆる条件でのデータ取得が開始された。偏波、ポインティングベクトルの同時観測は、その発生の機構を解明する絶好のデータを提供している。オーロラキロメートル電波は、サブトゥーム活動に呼応しさまざまな変動をみせる。EXOS-D のデータは、大きく5ランクにわけられるデータを得ている。特に Source 域に入って観測することができ、粒子加速の状況が詳細に示された、特に粒子加速域はいくつかのブロックにわかかれていて最大強度のランク5に近づくにつれ、それらは微細な構成を示すようになる。

また自然プラズマ波動のスペクトルは、局所的な静電プラズマ波が、プラズマ擾乱域では、電磁波へと変換される様相を、議論の余地のない、明確さで示している。この静電的プラズマ波動の電磁波への変換については、もう一つの顕著な発見は、極域電離圏のトップサイドより、ヘクトメートル波が、電磁波となって、宇宙空間に放射される事実が、確認されたことも、大きな貢献の一つである。

能動的プラズマ波動についても、完全な成功を納めている。サウンダーモードとして電離層トップサイドの電子密度のプロファイルを計測している事はもとより、全てのプラズマ波動共鳴、すなわち f_{UHR} 、 f_P 、 nf_C 、そして f_{Qn} 、 f_{Dn} 、それぞれ高域ハイブリッド共鳴プラズマ波共鳴、電子サイクロトロン高調波共鳴、静電的プラズマ波共鳴、そして系列的 diffuse plasma 共鳴を 6,000 km の非常に高い高度でも検出していて、今後プラズマ圏、オーロラ粒子加速域で、さまざまな角度から、波動粒子相互作用を解明するとともに、それらのプロセスがプラズマ圏や、磁気圏電離圏結合過程を支配する様相を明確にできるものとなっている。

あけぼの (EXOS-D) 衛星による、宇宙空間プラズマ波動の観測は完璧で、今後さまざまな状況で観測を続け、また搭載された相乗り機器との同時観測を通じ、磁気圏電離圏あるいは磁気圏・プラズマ圏とのエネルギーや物質、あるいは運動量のやりとりに関し、多くの謎を解明してゆくことが約束されている。

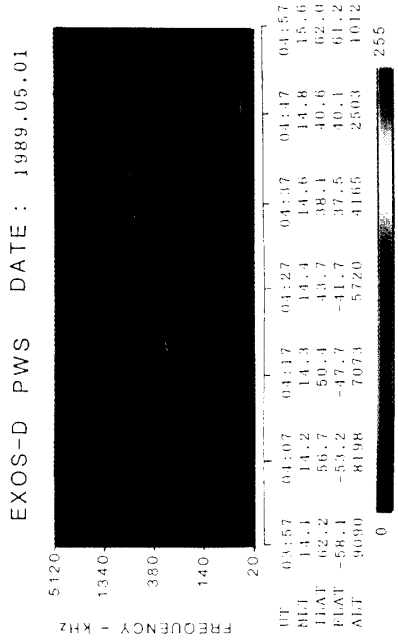


図5 1989年5月1日, 03:57から04:52UTの間に周波数掃引モードNPWで観測されたダイナミックスペクトル. 衛星高度は9090kmから2100kmまで変化している. 図中で明瞭な連続曲線は, 高域混成共鳴(UHR)波を示す. スペクトルは観測時間(UT)に対して20KHzから5.125MHzの周波数帯域を示す. 横軸には, 各時刻に対応する衛星位置をMLT(磁気地方時), ILAT(磁気不変緯度), FLAT(衛星を通る磁力線のつけ根の磁気緯度)およびALT(高度)として示す. スペクトル強度はカラーコードで表現されており, 各色の閾値は次の通り. 青: 3.0×10^{-17} (Volt²/m²Hz), 緑: 9.7×10^{-16} , 黄: 3.1×10^{-14} および赤: 1.0×10^{-12} である.

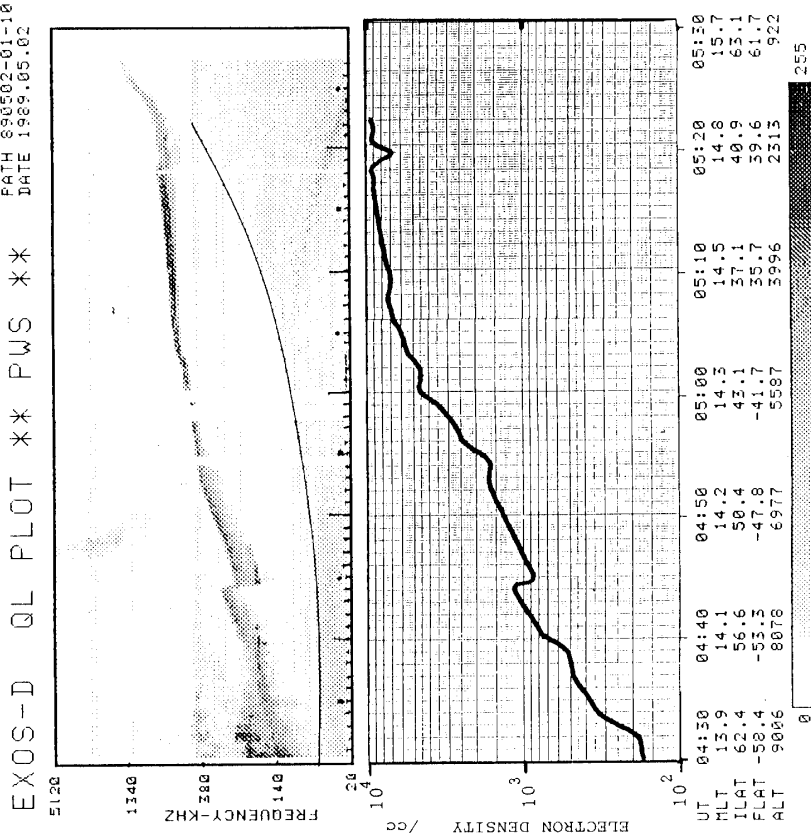


図6 観測されたUHRエミッションの周波数(上パネル)から求めた電子密度プロファイル例(下パネル). ダイナミックスペクトルは, 第5図と同じフォーマットで示されているが, プラズマ波強度は, 第5図での青から赤までに対応して, 白から黒の濃淡表示となっている. UHRエミッションの下にある連続曲線は電子サイクロトロン周波数(f_c)を示す.

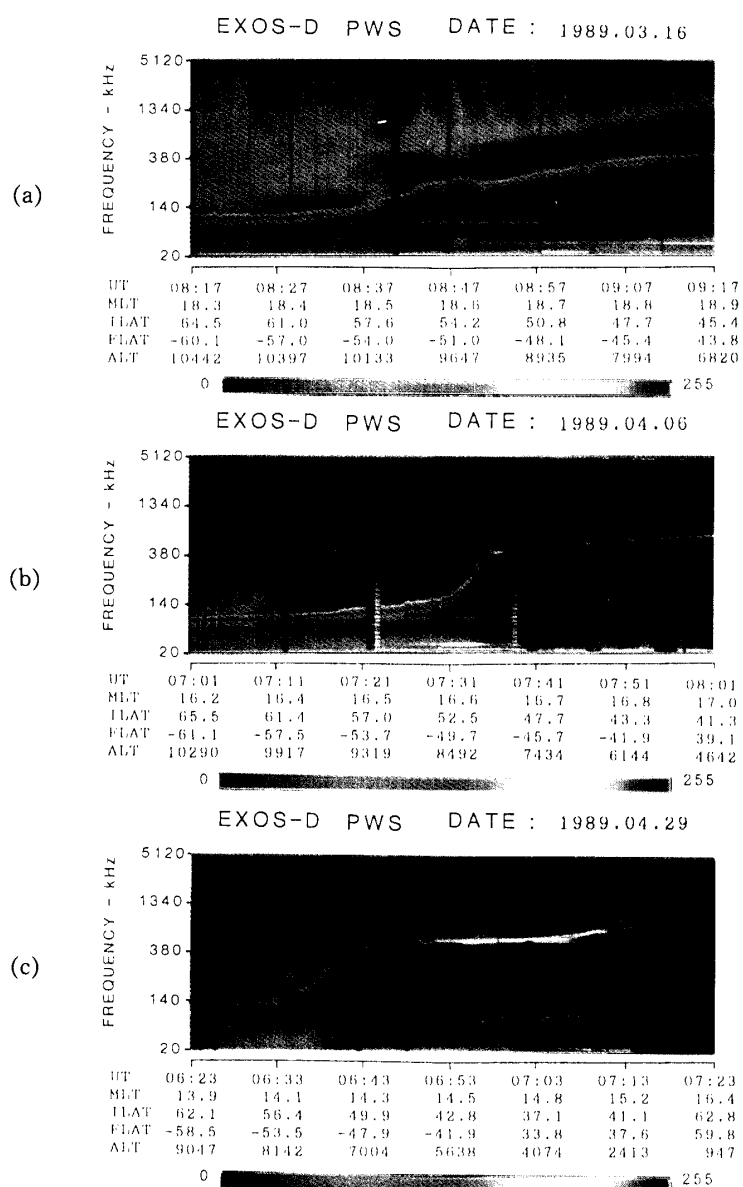


図7 (a): UHR エミッションの周波数変化より明らかとなった gradual type (G型) プラズマポーズの例. ダイナミックスペクトルは, 1989年3月16日の08:17UTから09:17UTまでのもので, 第5図と同じフォーマットである.

(b): Sharp type (S型) プラズマポーズの例. 1989年4月6日, 07:01UT~08:01UTに観測されたものである.

(c): Irregular type (I型) プラズマポーズの例. 1989年4月29日, 06:23UT~07:13UTに観測されたものである.

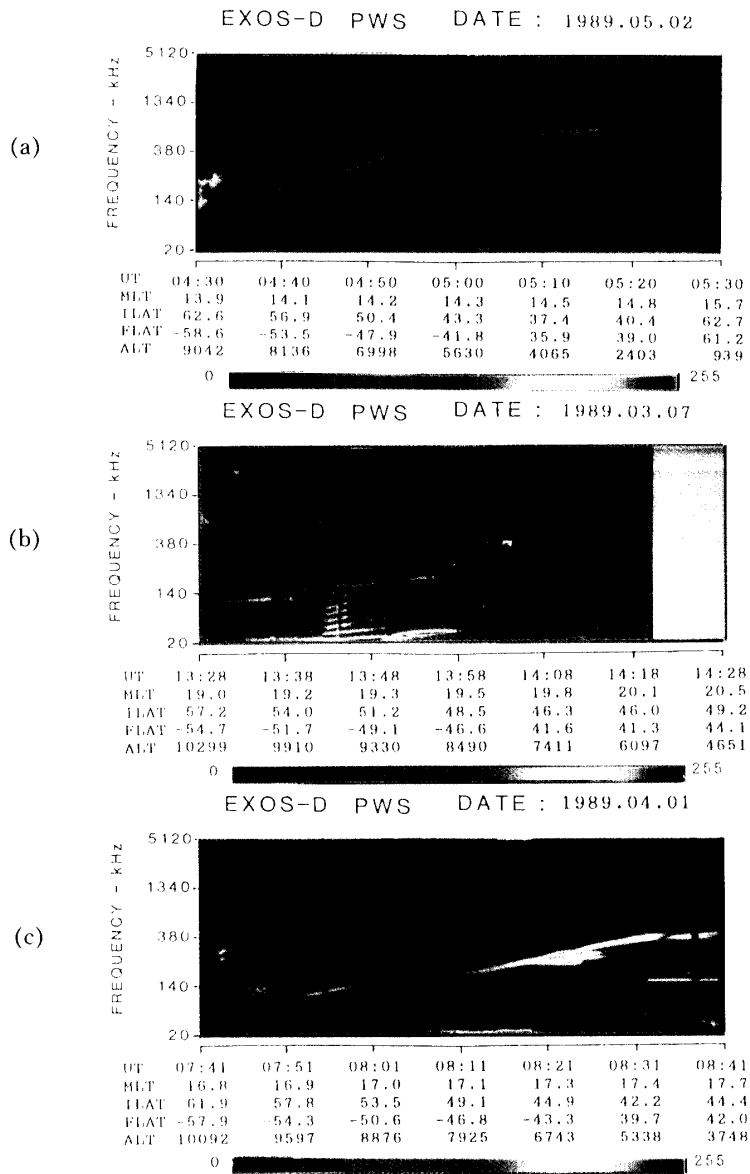


図8 (a) : 第7図(c)と同様の detached type (I_D 型) プラズマポーズの例. 1989年5月2日, 04:30UT~05:27UTに観測された. 高度は9800kmから7000kmまで変化している.

(b) : 第7図(c)と同様の large oscillatory type (I_O 型) プラズマポーズの例. 1989年3月15日, 11:15UT~11:55UTに観測された. 特に11:35UT(高度9900km)から11:45UT(高度9200km)にかけてプラズマ密度の大振幅揺らぎが存在している.

(c) : 第7図(c)と同様の multi shock type プラズマポーズの例. 1989年4月1日, 07:41UT~08:40UTの観測. 電子密度分布の急峻な変化が07:47UTおよび07:52UT前後に観測されている. これらはいずれもショック的様相を示す.

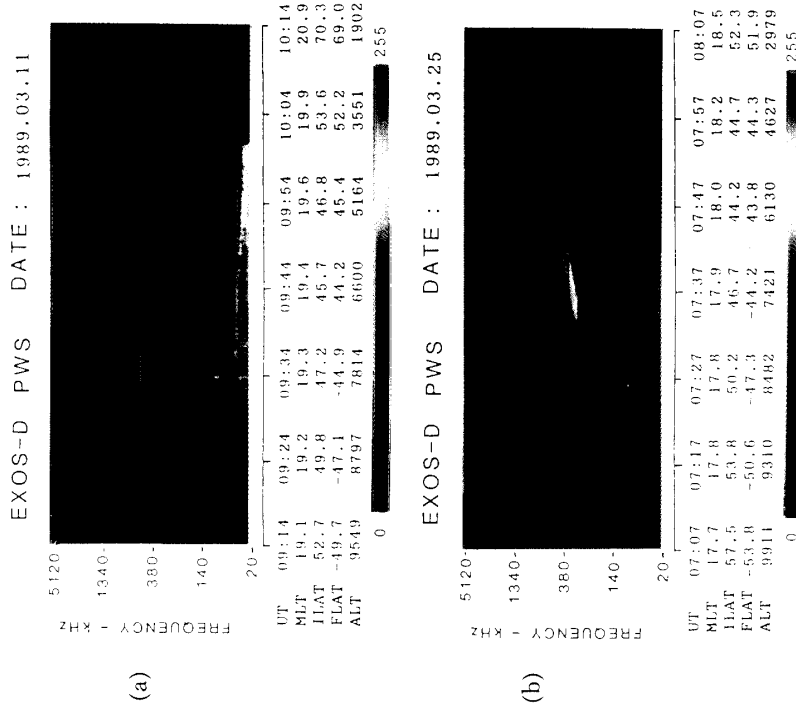


図9 赤道域ブラズマ密度擾乱の例. 第5図と同様DSモードのダイナミックスペクトルで表示.

- (a) 1989年3月11日, 09:14UT~09:59UTに観測された赤道域ブラズマ密度擾乱(EPDET)の小振幅 irregular 振動の例. 09:21UTから09:28UTにかけて衛星が地理赤道近傍を通過するのに伴いUHR周波数の周期的な振動が観測されている.
- (b) EPDETの非常に大きな irregularity の例. 1989年3月25日の07:07UT~07:39UTにかけて観測された, UHR周波数の顕著な大振幅不規則振動が衛星の地理赤道通過に伴い07:15UT~07:32UTに観測された.

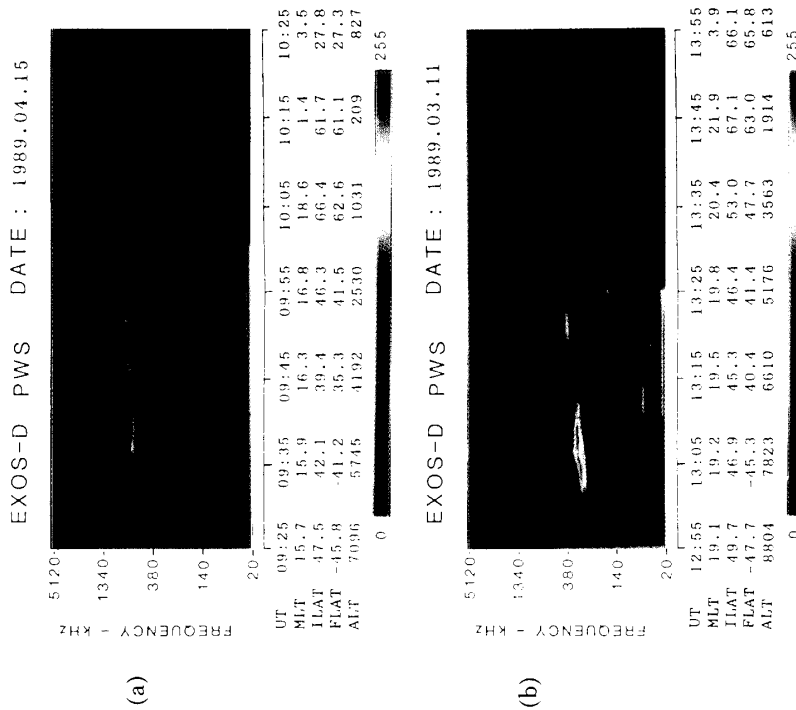


図10 赤道ブラズマ波動擾乱(EPWAT)現象. UHR放射の強度が赤道域において局所的に増大している. 図の表示フォーマットは第5図に同じ.

- (a) 1989年4月15日, UT09:25~09:59の観測例. 磁気赤道付近において, 明瞭なUHR波動の強度の増大が認められる. 衛星が磁気赤道を横切るとき, FLATの値はその符号が変化する.
- (b) 1989年3月11日, UT12:00~13:25に観測された, 非常に強いEPWAT現象の例. 磁気赤道を含む領域(UT13:00~13:10)において顕著なEPWAT現象が観測される.

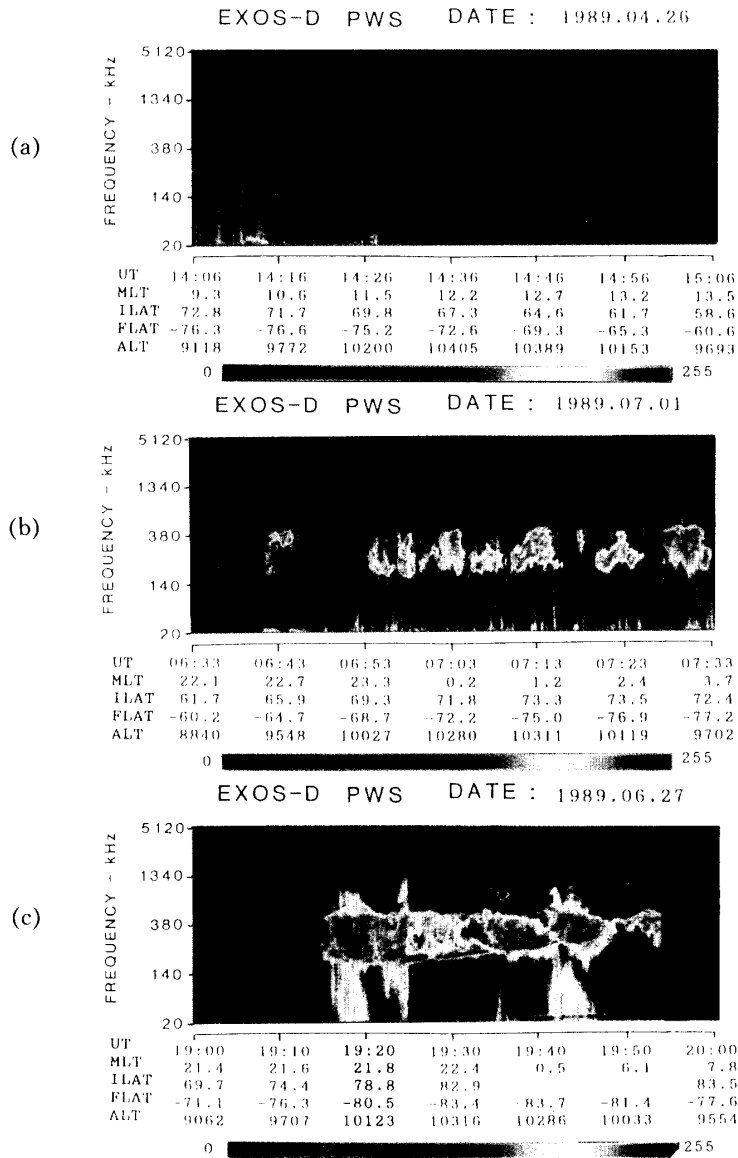
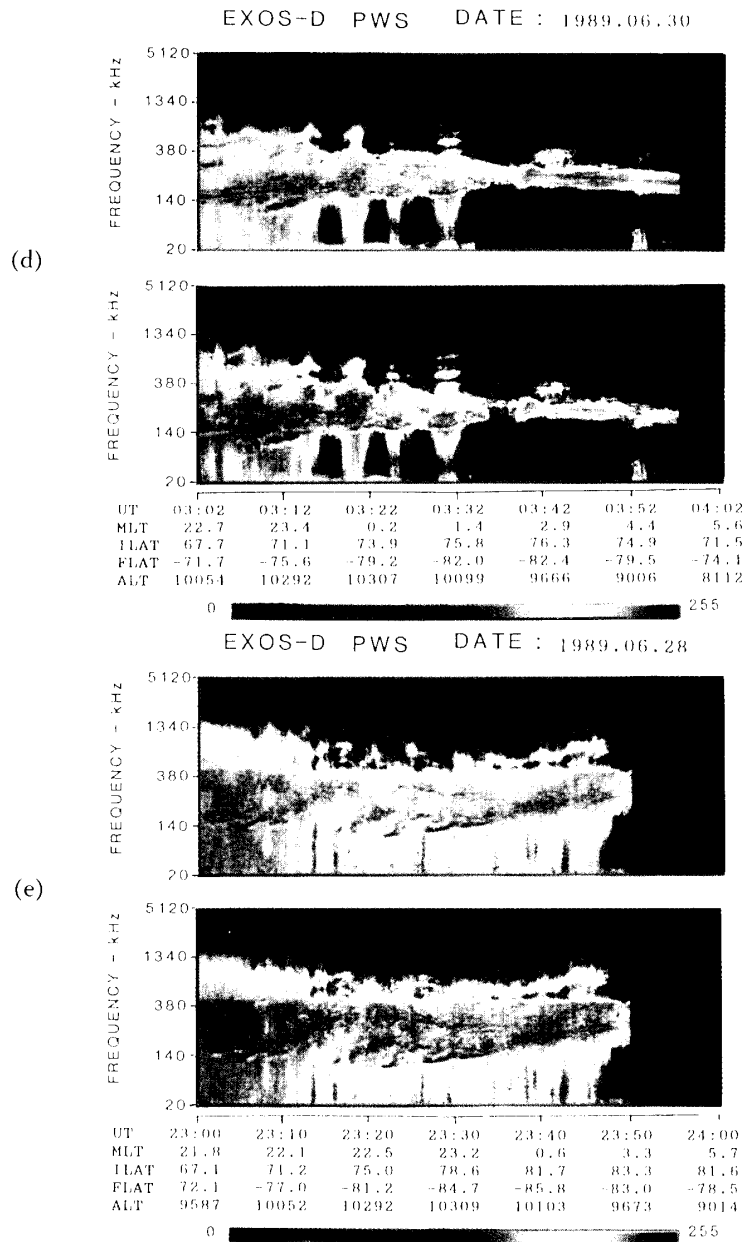


図14 オーロラ粒子加速域近傍で観測された AKR ダイナミックスペクトラム。パネル(a)からパネル(c)までの表示フォーマットは第5図に同じ。パネル(d)から(e)については偏波ダイナミックスペクトラム(上図が左旋, 下図が右旋偏波)を示す。

- (a) 非常に強度の弱い AKR スペクトラム。
- (b) 弱い強度の AKR スペクトラム。局所 UHR 波動より高い周波数域に AKR が出現している。300kHz 以上 500kHz の周波数領域では更に弱い AKR が観測されている。
- (c) AKR 強度が増大した例。AKR のスペクトラムの中に微細構造が存在する。スペクトラムの下限の周波数は局所的プラズマ周波数でカットオフを受けており、この場合、AKR はL-O モードの電磁波で放射されていることを示している。



(d) 非常に強い AKR 放射。AKR の周波数は 120kHz から 700kHz の広い周波数帯をカバーするが、(b) のパネルのケースと同様 3つの周波数グループに分けられる。

(e) 極めて強い AKR 放射の例。スペクトルはパネル (d)と同様の傾向を示すが、より広い周波数帯域に、より強い強度をもって出現している。

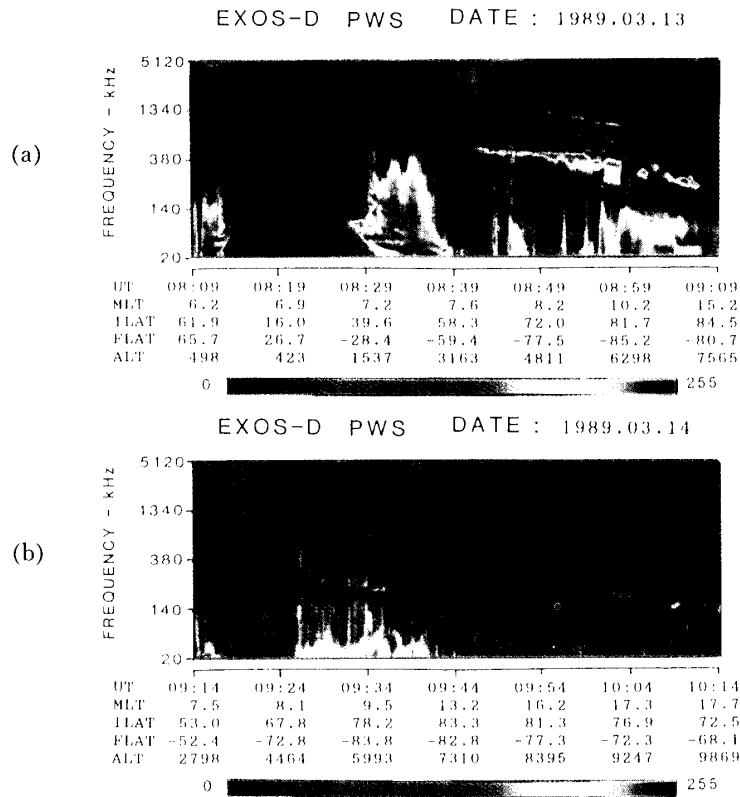


図15 (a) 北半球極域において観測されたホイッスラーモード波. 1989年3月13日 UT08:09~09:08において高度498km~7565kmの領域で観測. オーロラ粒子の降下とともに, UHR波動及び静電的プラズマ波動が顕著に増大している. UHR波動より高い周波数域においてタイプIII太陽電波が観測されている. この電波は, 衛星と電波源の間にある地球電離層によってカットオフを受けている.

(b) 1989年3月13日の大磁気嵐の回復期に観測されたプラズマ波動ダイナミックスpekトル. UT09:25~UT09:40の間にホイッスラーモード波の広帯域放射が出現している. このバースト状の広帯域ホイッスラーモード放射は, 沿磁力線電流及びその原因となる粒子降下現象と良い一致を示す.

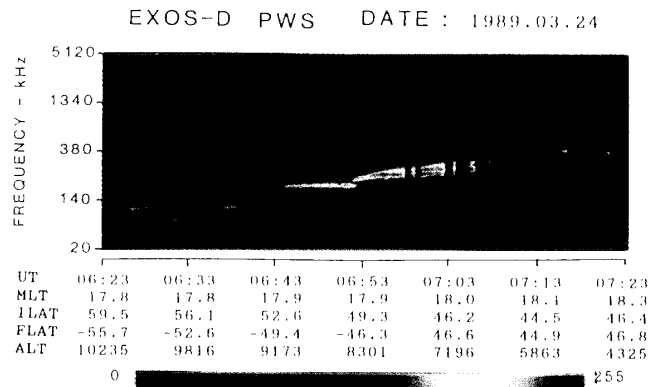


図16 1989年3月24日, UT06:23~UT07:23におけるPWSダイナミックスペクトラム. 図のフォーマットは第5図に同じ. 周波数がほぼ一定で横に延びるスペクトラムは, 局所的なUHR放射に融合する. すなわちプラズマ密度が大きな不規則構造を示す領域から放射されている波動は, 静電的プラズマ波動がプラズマの不均質を介して電磁波へと変換されている状況を示している.

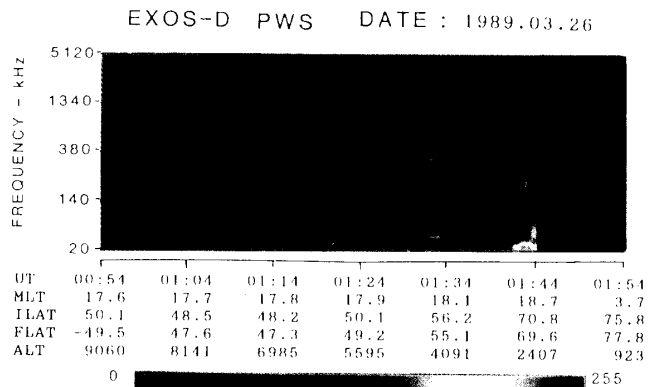


図17 地球ヘクトメトリック放射現象の典型例. 図のフォーマットは第5図に同じ. 2.1MHzから, 昼側電離層のプラズマ周波数(夕方側に位置する衛星地点での局所プラズマ周波数より高い周波数をもつ)でカットオフを受ける周波数までの帯域をもつ連続性放射は, 極域のトップサイド電離層から放射される地球ヘクトメトリック放射である.

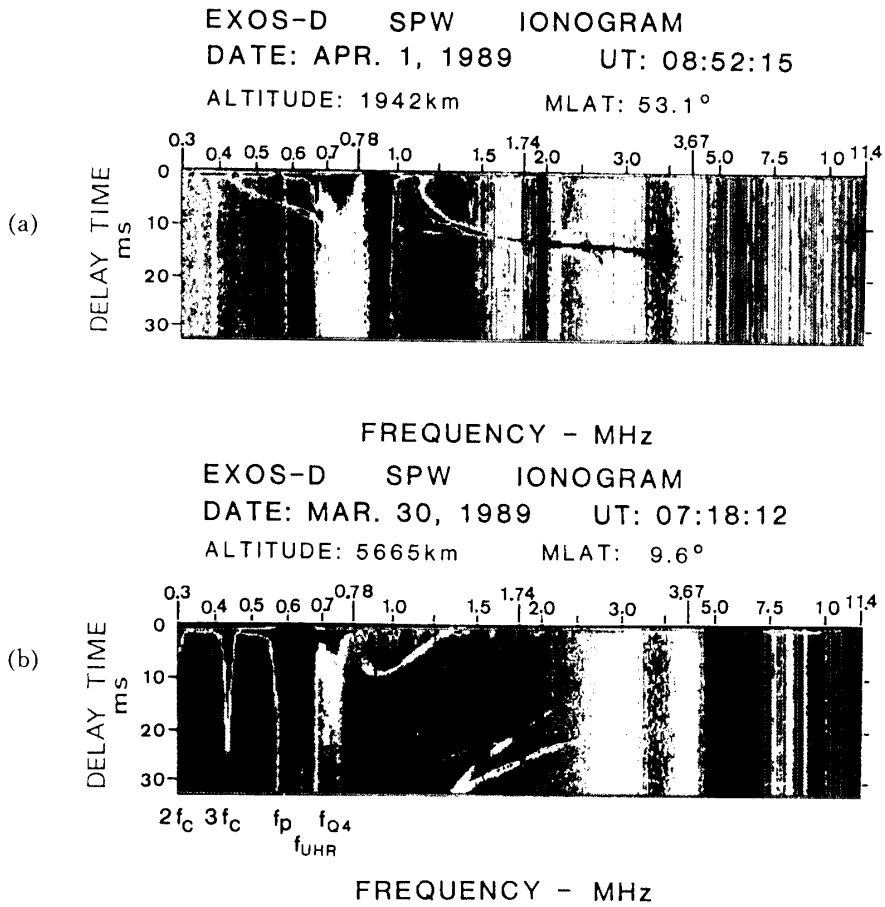


図18 プラズマ波動励起実験によって得られるプラズマ波動応答ダイアグラム(プラズマグラム)。図の表示のフォーマットは Alouette, ISIS, EXOS-B 及び EXOS-C 衛星の ionogram と同じである。横軸は放射パルスの周波数(MHz 単位)であり、縦軸にはパルス放射後のパルス応答の遅延時間が示される。パルス応答は5段階の強度で示される。図で青、緑、黄、ピンク及び赤で示される強度はそれぞれ 1.0×10^{-16} , 3.2×10^{-16} , 3.4×10^{-15} , 3.2×10^{-14} 及び $1.1 \times 10^{-13} \text{V}^2/\text{m}^2\text{Hz}$ の閾値をもつ。 f_c , f_p , f_{UHR} , f_{D1} , f_{Q3} , 及び f_{Q4} はそれぞれ、電子サイクロトロン共鳴プラズマ共鳴、高域ハイブリッド共鳴及び第3及び第4系列の静電的プラズマ共鳴をあらわす。

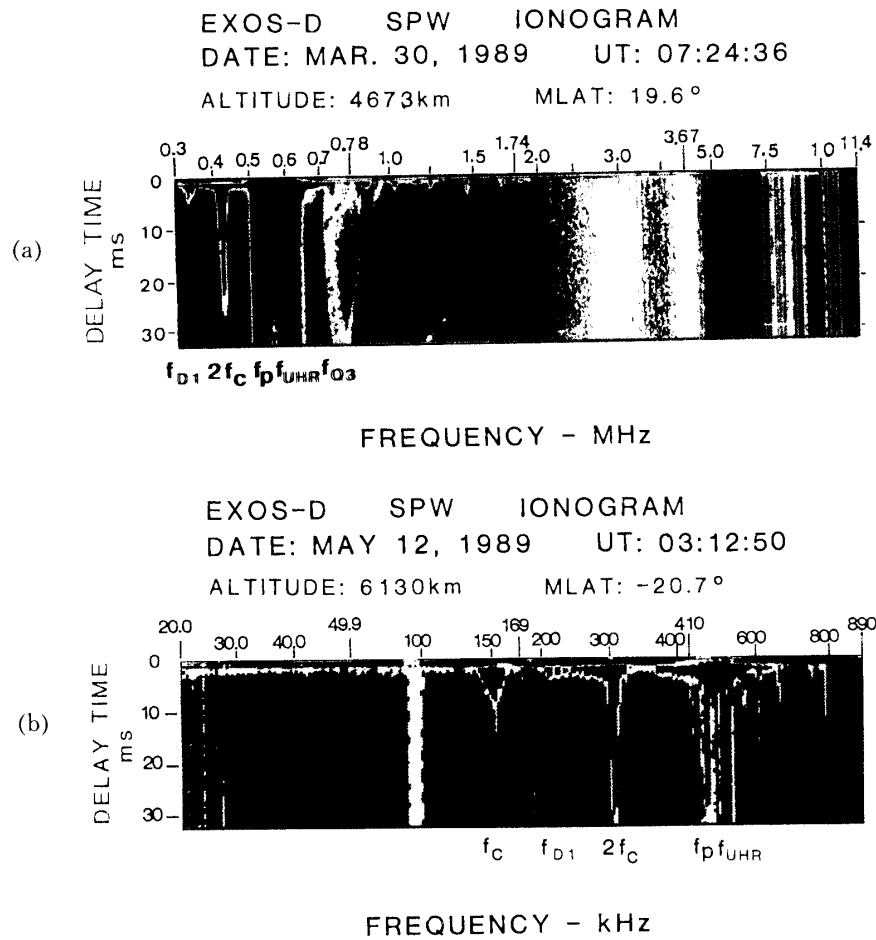


図19 (a) 1989年3月30日に観測されたプラズマグラム(フォーマットは図18と同じ)。この時衛星は、高度4673km、磁気緯度19.6°の北半球に位置していた。

(b) 高々度(6130km)の観測によるプラズマグラム。1989年5月12日。磁気緯度-20.7°の南半球における観測。

謝 辞

あけぼの (EXOS-D) 衛星は、宇宙科学研究所の、全力をあげての努力の結果、完璧な成功裡にオペレーションに入った、たずさわった全てのスタッフ、メーカーの方々に心から感謝の意を表わしたい。

参 考 文 献

- [1] Gurnett, D.A., The earth as a radio source: Terrestrial kilometric radiation, *J. Geophys. Res.*, 79, 4227-4238, 1974.
- [2] Gurnett, D.A., S.D. Shawhan and R.R. Shaw, Auroral hiss, Z mode radiation and auroral kilometric radiation in the polar magnetosphere: DE-1 observations, *J. Geophys. Res.*, 88, 329, 1983.
- [3] Kurth, W.S., M.M. Baumbach and D.A. Gurnett, Direction-finding measurements of auroral kilometric radiation, *J. Geophys. Res.*,
- [4] James, H.G., Measurements of auroral kilometric radiation and associated ELF data from ISIS-1, *J. Geophys. Res.*, 85, 3367-3375, 1980.
- [5] Kaiser, M.L., J.K. Alexander, A.C. Riddle, J.B. Pearce and J.W. Warwick, Direct measurements by Voyagers 1 and 2 of the polarization of terrestrial kilometric radiation, *Geophys. Res. Lett.*, 5, 857-860, 1978.
- [6] Kaiser, M.L. and R.G. Stone, Earth as an intense planetary radio source: Similarities to Jupiter and Saturn, *Science*, 189, 285, 1975.
- [7] Benson, R.F., Source mechanism for terrestrial kilometric radiation, *Geophys. Res. Lett.*, 2, 52-55, 1975.
- [8] Benson, R.F., Harmonic auroral kilometric radiation of natural origin, *Geophys. Res. Lett.*, 9, 1120-1123, 1982.
- [9] Benson, R.F. and W. Calvert, ISIS 1 observations at the source of auroral kilometric radiation, *Geophys. Res. Lett.*, 6, 479-482, 1979.
- [10] Benson, R.F., W. Calvert and D.M. Klumpar, Simultaneous wave and particle observation in the auroral kilometric radiation source region, *Geophys. Res. Lett.*, 7, 959-1062, 1980.
- [11] Calvert, W., The signature of auroral kilometric radiation on ISIS-1 ionogram, *J. Geophys. Res.*, 86, 76-82, 1981.
- [12] Alexander, J.K. and M.L. Kaiser, Terrestrial kilometric radiation from the magnetospheric cusp and dayside magnetosheath, *J. Geophys. Res.*, 82, 98-104, 1977.
- [13] Oya, H. and A. Morioka, Subsidiary UHR emissions observed by satellite Jikiken (EXOS-B), *J. Geomag. Geoelectr.*, 33, 17-35, 1981.
- [14] Oya, H. and A. Morioka, Observational evidence of Z and L-O mode waves as the origin of auroral kilometric radiation from Jikiken (EXOS-B) satellite, *J. Geophys. Res.*, 88, 6189-6203, 1983.
- [15] Knecht R.W., T.E. Van Zandt and S. Russell, First pulsed radio soundings of the topside of the ionosphere. *J. Geophys. Res.*, 66, 3078, 1961.

- [16] Lockwood G.E.K. and G.L. Nelms, Topside sounder observations of the equatorial anomaly in the 75°W longitude zone, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 26, 569, 1964.
- [17] Nelms G.L. and G.E.K. Lockwood, Early results from the topside sounder in the Alouette II satellite, *Space Research, VII*, North-Holland Publ. Co., Amsterdam, 1967.
- [18] Jackson, J.E. and E.S. Warren, Objectives, history and principal achievements of the topside sounder and ISIS program, *Proc. Inst. Elec. Electron. Engrs.*, 57, 861–865, 1969.
- [19] Franklin, C.A., and M.A. Maclean, The design of swept-frequency topside sounder, *Proc. Inst. Electron. Engrs.*, 57, 897–929, 1969.
- [20] Hagg, E.L., E.J. Hewens, and G.L. Nelms, The interpretation of topside ionogram, *Proc. Inst. Elec. Electron. Engrs.*, 57, 949–960, 1969.
- [21] Morioka, A., H. Oya and S. Miyatake, Terrestrial kilometric radiation observed by satellite Jikiken (EXOS-B), *J. Geomag. Geoelectr.*, 33, 37–62, 1981.
- [22] Oya, H., A. Morioka and T. Obara, Leaked AKR and terrestrial hectometric radiations discovered by the plasma wave and planetary plasma sounder experiments on board the Ohzora (EXOS-C) satellite-Instrumentation and observation results of plasma wave phenomena, *J. Geomag. Geoelectr.*, 37, 237–262, 1985.
- [23] Morioka, A. and H. Oya, Emissions of plasma waves from VLF to LF ranges in the magnetic polar regions-New evidences obtained from the data of the Ohzora (EXOS-C) satellite, *J. Geomag. Geoelectr.*, 37, 263–284, 1985.
- [24] Okada, T., T. Nagano, K. Hashimoto, I. Kumura, H. Oya, and A. Morioka, Design of a small loop antenna system for receiving waves in VLF and MF bands using a series-transformer network, *Trans. IEICE*, 70, 550–561, 1987.
- [25] Morioka, A., H. Oya and K. Kobayashi, Polarization and mode identification of auroral kilometric radiation by PWS system on board the Akebono (EXOS-D) satellite, submitted to *J. Geomag. Geoelectr.*, 1989.
- [26] Oya, H. and T. Obayashi, Rocket measurement of the ionospheric plasma by gyroplasma probe, *Rep. Ionos. Space Res. Jpn.*, 21, 1–8, 1967.
- [27] 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, 331–361, 1975.
- [28] Oya, H., T. Takahashi, A. Morioka and H. Miyaoka, Wavy patterns of ionospheric electron density profiles triggered by TID-Observation results of electron density by Taiyo satellite, *J. Geomag. Geoelectr.*, 24, 509–525, 1982.
- [29] Oya, H., T. Takahashi and S. Watanabe, Observation of low latitude ionosphere by the impedance probe on board the Hinotori satellite, *J. Geomag. Geoelectr.*, 38, 111–124, 1986.
- [30] Watanabe, S. and H. Oya, Occurrence characteristics of the equatorial plasma bubbles and blobs observed with the impedance probe on board the satellite Hinotori, *J. Geomag. Geoelectr.*, 28, 125–150, 1985.
- [31] Takahashi, T., H. Oya, S. Watanabe and Y. Watanabe, Observation of electron density by impedance probe on board the Ohzora (EXOS-C) satellite, *J. Geomag. Geoelectr.*, 37, 389–411, 1985.

- [32] Fukunishi, H., R. Fujii, S. Kokubun, K. Hayashi, T. Tohyama, Y. Tonegawa, S. Okano, K. Yumoto, M. Sugiura, I. Aoyama, T. Sakurai, T. Saito, T. Iijima, A. Noshida, and M. Natori, Magnetic field observations on the Akebono (EXOS-D) satellite, submitted to *J. Geomag. Geoelectr.*, 1989.
- [33] Oya, H., Conversion of electrostatic plasma waves into electromagnetic waves: Numerical calculation of the dispersion relation for all wavelengths, *Radio. Sci.*, 6, 1131–1141, 1971a.
- [34] Oya, H., Origin of Jovian decameter wave emissions -Conversion from the electron cyclotron plasma wave to the ordinary mode electromagnetic wave, *Planet. Space Sci.*, 22, 687–708, 1974.
- [35] Jones, D., Source of terrestrial nonthermal radiation, *Nature*, 260, 686–689, 1976.
- [36] Okuda, H., M. Ashour-Abdalla, M.S. Chance, and W.S. Kurth, Generation of nonthermal continuum radiation in the magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, 87, 10457–10462, 1982.
- [37] Obara, T. and H. Oya, Plasma conditions in the polar ionosphere observed in SPW experiments of PPS system on board the Ohzora (EXOS-C) satellite, *J. Geomag. Geoelectr.*, 37, 285–307, 1985.
- [38] Oya, H., Sequence of diffuse plasma resonance observed on Alouette data, *J. Geophys. Res.*, 75, 4279–4285, 1970.
- [39] Oya, H., Verification of theory on weak turbulence relating to the sequence of diffuse plasma resonances in space, *Phys. Fluids*, 14, 2487–2499, 1971b.
- [40] Oya, H. and T. Ono, Stimulation of plasma waves in the magnetosphere using satellite Jikiken (EXOS-B), *Advan. Space Sci. Res.*, 1, 217–220, 1981.
- [41] Oya, H., T. Ono and T. Kamada, Stimulation of plasma waves in the magnetosphere using satellite Jikiken (EXOS-B) Part 1 Observation of plasma resonances, *J. Geomag. Geoelectr.*, 33, 2–25, 1981.
- [42] Ono, T., and H. Oya, Electrostatic electron cyclotron harmonic (ESCH) echoes found near the plasmopause by the EXOS-B (Jikiken) satellite, *Geophys. Res. Lett.*, 15, 156–159, 1988.