

地球周辺プラズマ波動の総合的観測
——EXOS-C（おおぞら）に搭載された PPS 観測の結果*

大家 寛**・森岡 昭**

（1985 年 1 月 7 日受理）

Integrated Observations of Plasma Waves Surrounding the
Earth——Observation results of PPS (Planetary Plasma
Sounder) on board the EXOS-C astellite.

By

S. OYA and A. MORIOKA

Abstract: Planetary Plasma Sounder (PPS) system on board the EXOS-C satellite has made wide variety of observations of the plasma wave phenomena in the earth's ionosphere covering from the polar region to the equatorial region. In the NPW mode of the PPS systems, the natural plasma wave phenomena have been observed; these are summarized as

- 1) Excitation of the local plasma waves associated with the auroral particle precipitations,
 1. a) Local UHR waves,
 1. b) Local Z-mode waves,
 1. c) Conversion of the local Z-mode waves to the L-O mode waves,
- 2) Propagating electromagnetic waves,
 2. a) Leaked auroral kilometric radiations,
 2. b) Clear separation of polar chorus and auroral hiss,
- 3) Electrostatic and electromagnetic noises relating to the particle precipitations in the region of the Brazilian magnetic anomaly, and
- 4) Electrostatic plasma shock waves excited by the moving spacecraft.

* 宇宙研特別事業費による研究論文

** 東北大学理学部

All of these phenomena obtained through the initial phase of the EXOS-C (Ohzora) satellite observation clarify the wave-particle interaction processes in the earth's ionosphere as well as in the region of the polar region relating to the auroral particles.

概 要

EXOS-C (おおぞら) に搭載されている PPS (プラネタリー・プラズマサウンダー) システムは、準極軌道に沿う広範囲にわたるプラズマ波動現象を観測している。それらは

1. 極域におけるオーロラ粒子降下にもなう局所的プラズマ波動の励起
 1. a 局所的ハイブリッドモード波
 1. b 局所的 Z モード波
 1. c Z モード波の L-O モード波 (ヘクトメータ波) への変換
 2. 電磁波の伝搬
 2. a 漏洩型 AKR
 2. b 極域コーラスとオーロラ域ヒスの分離状況
 3. ブラジル地磁気異常帯における粒子降下にもなう静電的プラズマ波及び電磁波雑音の発生
 4. 飛翔体の運動にもなう静電的プラズマ衝撃波の発生
- である。EXOS-C の初期観測期に行なわれている電離層ならびにオーロラ域での波動粒子相互作用の過程を明かす重要な鍵としてここに報告する。

1. 序

第9号科学衛星おおぞら (EXOS-C) に搭載されたプラネタリー・プラズマサウンダー (Planetary Plasma Sounder-PPS) 装置は極域ならびにブラジル地磁気異常帯におけるプラズマ現象の観測を目的としたもので、自然プラズマ波動の他、高周波サウンダーを搭載し、広範囲にわたる電離層領域で電子密度分布とともに波動粒子相互作用の効果を観測する新たな目的をもったものである。まず、計画に従って1984年5月16日、互に直交する Tip to Tip 40 m にわたるダイポールアンテナを二対、伸展する事に成功し PPS の観測が開始され、以下の諸項目の観測が実施されるようになった。すなわち

1. 自然プラズマ波の観測
 - 1.1. 粒子降下に関する局所的なプラズマ波動の励起
 - a) ブラジル地磁気異常帯における電磁波放射
 - b) 準オーロラ帯における降下粒子の効果
 - c) オーロラ粒子降下による波動現象
 - c 1. UHR モード波

- c 2. オーロラヒス
 - c 3. 地球のヘクトメートル波
 - 1.2. 漏洩型 (Leaked) オーロラキロメートル波
 - 1.3. 静電的衝撃波
- であり、また、能動実験は下記のとおりとなる。すなわち
- 2. プラズマ波励起実験

- 2.1. プラズマ分布構造と擾乱
 - a) 極域電離層中におけるスプレッド F 現象
 - b) 中低緯度電離層におけるプラズマバブルとブロップ
 - c) 電離層の全地球的分布
- 2.2. プラズマ波の人工的な励起実験
 - a) プラズマ波共鳴現象
 - b) プラズマ波の非線形効果

といった多岐にわたるものである。

本論文はこの EXOS-C に搭載された PPS 装置による初期観測のうち自然プラズマ波動観測の報告を目的とし、まず観測装置の内容、初期データーの紹介、そして新しく発見された波動粒子相互作用現象についてのべる。

2. 観 測 機 器

PPS 装置は大別して二つの機能よりなる。その一つは自然プラズマ波動の観測部であり、他の一つはサウンダー部、すなわち波動励起実験を行うものである。

第 1 図に機器の構成を示す。一本 65 feet (約 20 m) の素子よりなり互に直交する Tip to Tip 40 m の二対のダイポールアンテナ系は Antenna switch 回路を介して全目的に使用される。

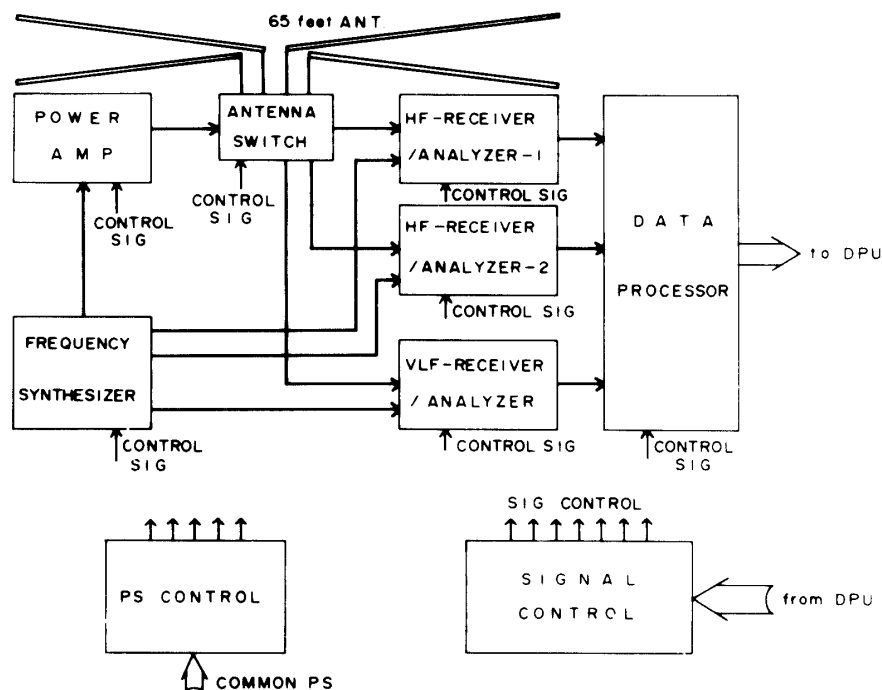
2-1 自然プラズマ波観測部

このシステムは 500 Hz~20 kHz までの VLF 部と 100 kHz~16 MHz の高周波部に分離される。なお、高周波部には、18.4, 20.0, 21.8 および 24.3 MHz の 4 波の固定周波数観測部がある。VLF-Receiver 及び Analyzer が VLF 受信部を代表しているが、0.5~20 kHz を 32 step にわけ 400 Hz の帯域でこれを 125 msec 毎に切りかえてゆく。

検出最低レベル、すなわち最高感度は $2 \mu\text{Volt}$ となる。したがって、有効アンテナ長を考慮すれば、 $5 \times 10^{-8} \text{ Volt/m}$ の電界強度まで検出可能となる。

高周波部は、100 kHz~16 MHz にわたる周波数帯を 448 step で 2 秒間 (または 8 秒間) にて掃引する。観測対象に応じ、2, 10 及び 20 kHz の帯域を切り換えている。最低受信レベルは -126 dBm となる。高周波部はさらに 4 つの固定周波数をもっていて、惑星電波のモニターも可能になっている。

また、電波の性格を明らかにするものとして、偏波計測を行う。これは同じ周波数帯域において周波数掃引しながら、同偏波のポーラリゼーションの右旋、左旋の別を明らかにするもので、このため 2 系統の受信機 HF-Receiver/Analyzer 1 及び 2 (第 1 図参照) が



第1図 プラネタリープラズマサウンダーのシステム図. Tip to tip 120 フィート (約 40 m) の2組のアンテナによって, 自然プラズマ波の HF, VLF の同時観測あるいはアンテナをクロスダイポールとした偏波計測が行なわれる. また波動励起実験時には一方のアンテナによって高周波パルスを印加し他方でプラズマの応答を受信する.

使われている。

2-2 波動励起実験部

波動励起実験部では 100 kHz~16 MHz 帯にわたり, 周波数を掃引しつつ, 時間間隔 244 μ sec のパルス伝送を行う. 伝送電力は 60 Watt 及び 300 Watt を切りかえる事ができる. 波動励起を行った結果は基本的には自然プラズマ波観測部のものと同じである. ただ, 周波数帯域を 20 kHz に拡大し, パルスに応動できるようにし, また Pulse 間隔 62.5 msec に合わせ, 全掃引時間は 32 sec 及び 64 sec の二通りになるようにし, 自然プラズマ波動観測の場合に比し, 長時間を要する.

以上の諸特性は第一表に総括している.

3. Local Emission

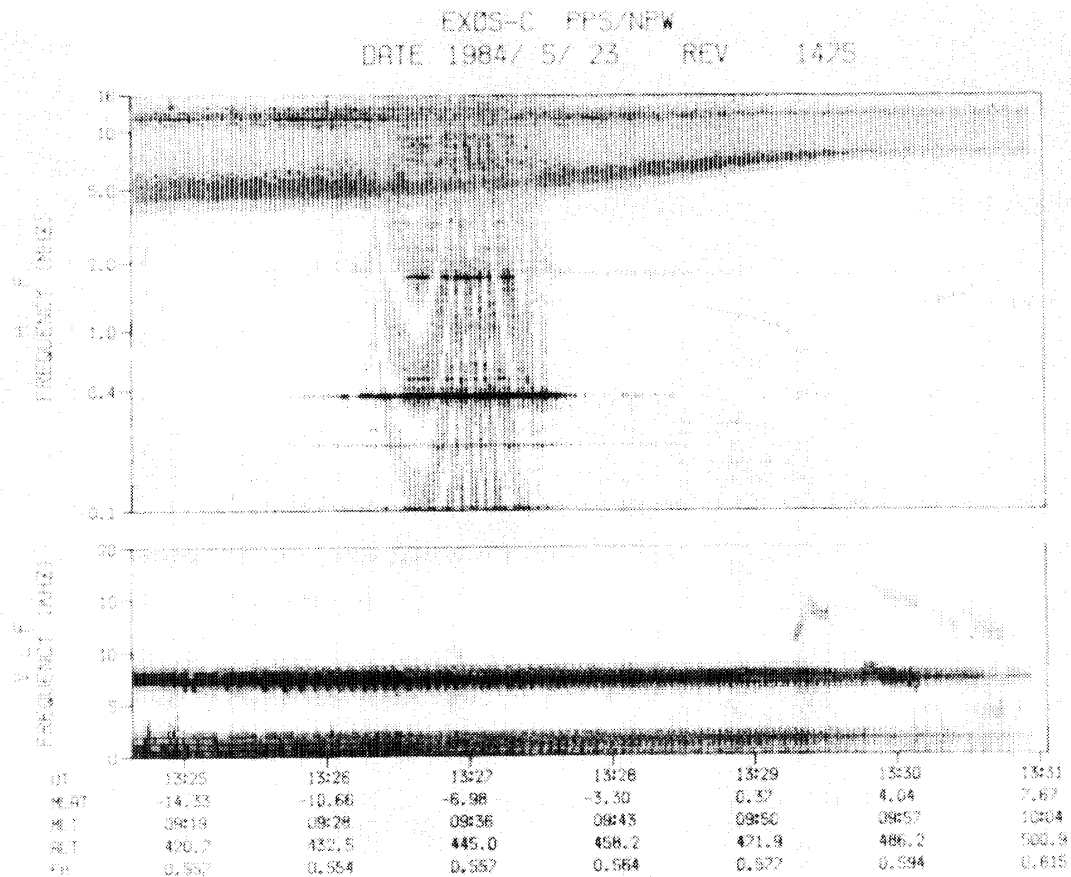
観測されている自然プラズマ波動は, 粒子降下に伴って励起される局所的な波動現象と, その起源では同じく粒子との相互作用で生じ伝搬する波動モードに大別される. まずこの節では前者の局所的な波動現象について述べる.

3-1 南大西洋磁気異常帯におけるプラズマ波動

南大西洋磁気異常帯では放射線帯粒子の磁気反射点が低くなるため, 高エネルギー粒子

第 1 表 PPS・自然プラズマ波観測部の特性

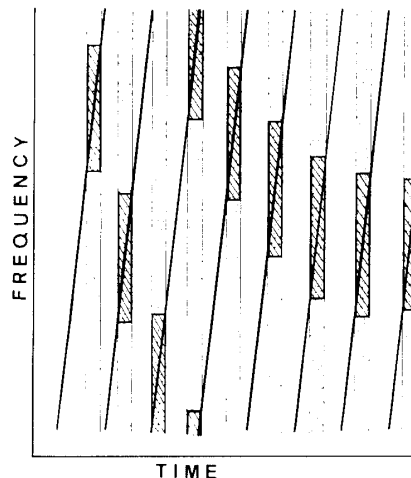
	高周波部	VLF 部
受信周波数範囲	<ul style="list-style-type: none"> ● 100 kHz - 16 MHz (448ステップ) ● 固定 4 周波数 	0.5 - 20 kHz (32ステップ)
時間分解能	2 秒 / 8 秒	0.125 秒
周波数分解能	2 / 10 / 20 kHz	400 Hz
入力感度	-126 dB _m	2 μV
偏波計測	掃引及び固定モード	——



第 2 図 南大西洋地磁気異常帯で観測されたプラズマ波動。上段は 100 kHz から 16 MHz までの HF 帯のダイナミックスpektrum, 下段は 500 Hz から 20 kHz までの VLF 波動ダイナミックスpektrumを示す。HF 帯にみられる縞模様は、南大西洋地磁気異常帯において降下する高エネルギー粒子のパルス状変動によって励起された準周期的波動放射が、受信機の周波数掃引とのビート作用によって生じたものである。

が電離層深くまで侵入し、このため大気との衝突でエネルギーを失なうことになる。この効果に関連して特異なプラズマ現象がこれまでの衛星観測でいくつか報告されている[1][2]。この現象を波動-粒子相互作用の立場から解明することが EXOS-C 衛星の1つのテーマであるわけであるが、初期の観測から得られた典型的な例を第2図に示す。図の上段には周波数 100 kHz から 16 MHz までの HF 帯のダイナミックスペクトラム、下段には 500 Hz から 20 kHz までの VLF スペクトラムが示されている。衛星が南大西洋磁気異常帯の真上にさしかかった 13:26 UT から 13:28 UT の間に HF 帯のスペクトラムは 100 kHz から少なくとも 5 MHz までの広い周波数帯にわたって縞模様のパターンを示した。ここでこの縞模様は本来の波動のスペクトル変化を示すものではなく、次の様な効果が介在した為と理解される。すなわち、NPW 受信機の周波数掃引周期 2 秒に対して準周期的なパルス状波動が受信された際に生じる一種のビート効果である。第3図には模式的にこの効果を図示するが、観測された縞模様の形から実際にパルス状に放射されている波動の繰り返し周期は、0.1 秒~0.5 秒程度と計算される。

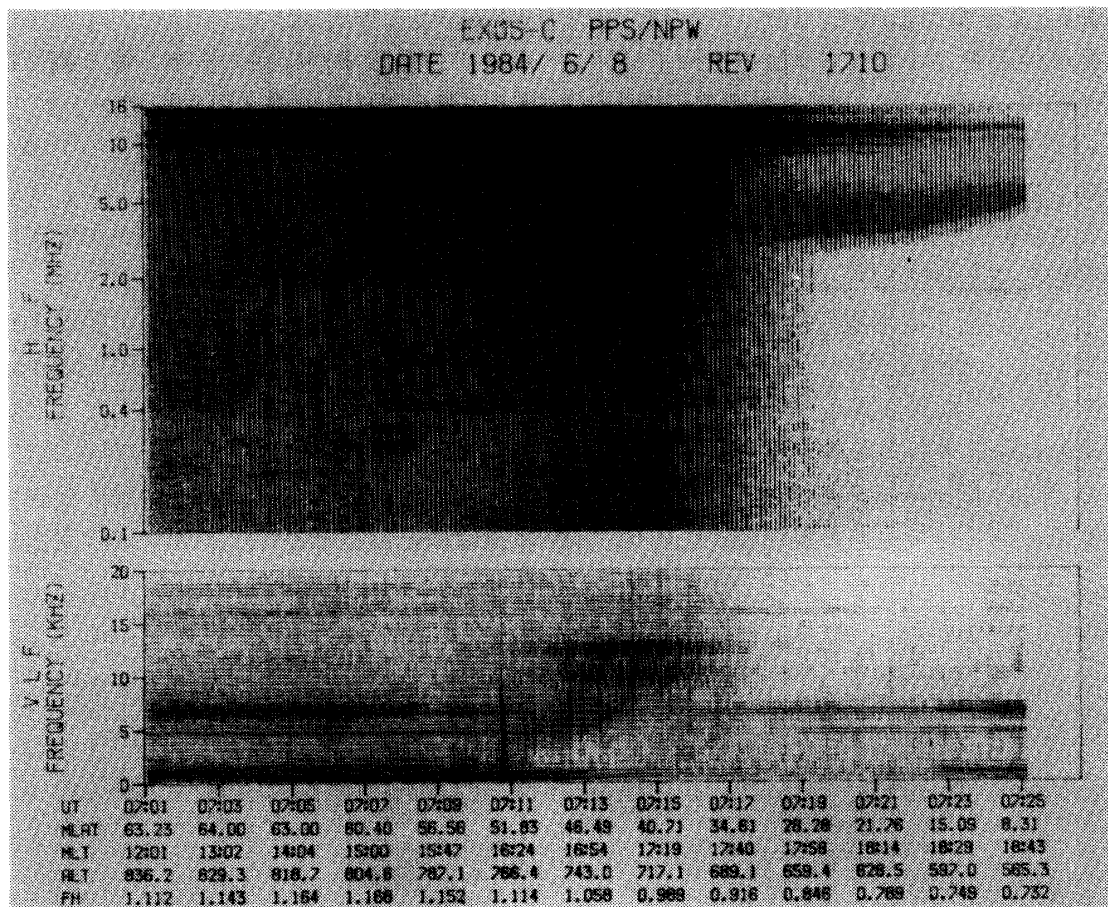
この高周波域波動スペクトラムから推定される準周期的波動放射は、その領域に降下する高エネルギー粒子のパルス状の変動を反映しているものと考えられる。この点に関しての詳細な検討は今後開始される各観測機器の結果を持ち寄った総合データ解析において行なわれることになる。



第3図 南大西洋地磁気異常帯で観測された縞模様スペクトラム(第2図)を説明する模式図。受信機の掃引時間より短い周期をもつパルス状波動が受信されるとダイナミックスペクトラム上には縞模様となってあらわれることが示される。

3-2 サブオーロラ域における波動現象

プラズマトラフと呼ばれる領域において特有のプラズマ波動現象がしばしば観測される(第4図参照)。周波数帯は HF から VLF にわたるものであるが、特に HF のスペクトラムはほぼ受信帯域全体にわたってその成分をもつ。すなわち自由空間波動からホイッスラ



第4図 サブオーロラ域における波動ダイナミックスペクトラム。
磁気緯度 $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$ の領域において HF 帯の広い周波数範囲にわたって強い波動が観測される。同時に VLF 帯においてもエミッションが観測される。

一モード波までの全領域にその成分をもっていることになる。このことは、検出された現象は少なくとも HF 領域においては波動というより衛星の帯電現象に起因した静電放射を受信していると考えられる。事実この現象が観測される領域では高エネルギー粒子のフラックスが増大しており高エネルギー粒子降下が衛星の電磁環境を攪乱する効果と波動励起との両面から検討を加えることが必要である。この現象は前述の南大西洋磁気異常帯における現象と波動のスペクトラム帯域がほぼ同じであることから波動励起の機構は同一であることが推測されるが、降下粒子のスペクトラムやその出現特性と波動スペクトラムの詳細な検討を行い morphology を明らかにし、理論的検討のための観測事実を積み上げていく必要がある。

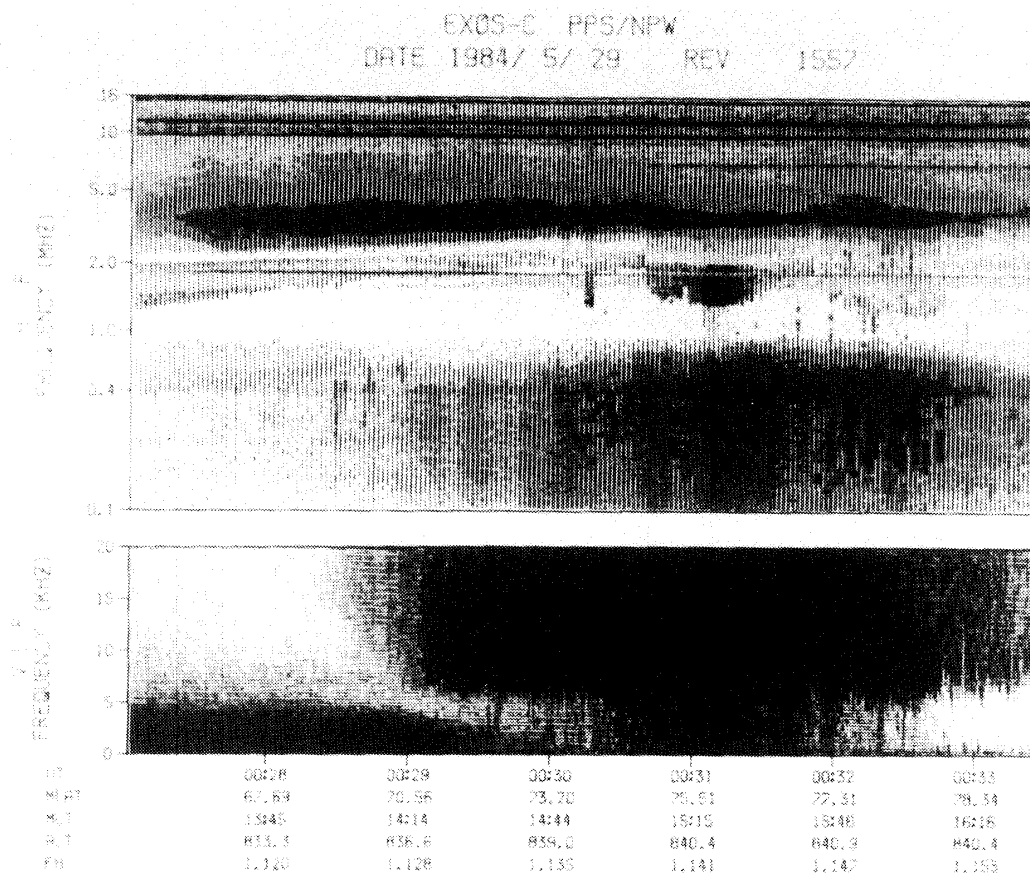
VLF 帯にみられるホイッスラーモードの放射現象は、エネルギー粒子による直接の波動励起と考えられるが、少なくとも 20 keV 以下の電子とは相関がなく 200 keV 以上の電子との相関が良いという事実が得られている。

3-3 オーロラヒス

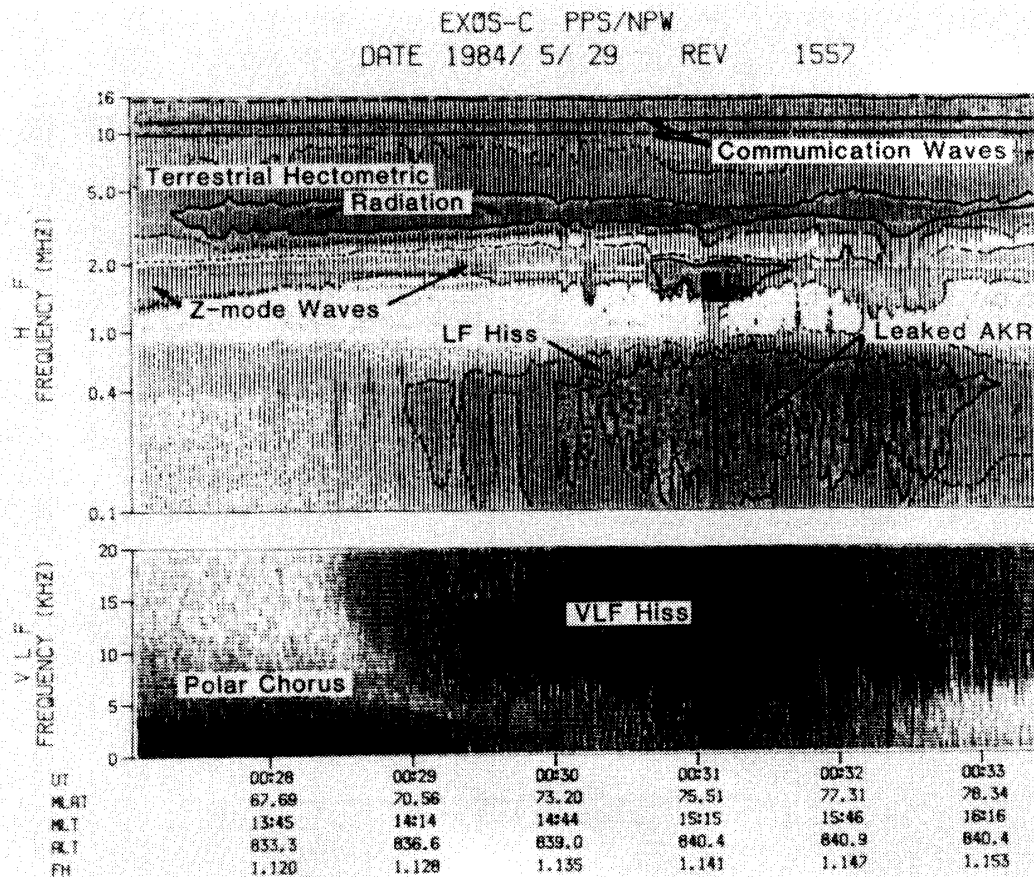
極域の上空ではオーロラ粒子の降下に伴う種々の波動現象が存在するが、第5図には EXOS-C が観測した極域波動現象の典型例を掲げ、第6図にその模式化した図を示す。

VLF 帯のオーロラヒスはこれまで Injun-3 による観測[3]以来多くの衛星によって調べられてきているが LF 帯のオーロラヒスの振舞はほとんど報告されていない。しかしオーロラヒスの発生域の下限の高度、すなわちオーロラ粒子によるホイッスラー波の励起の周波数と高度領域を明らかにしていく上で、LF 帯ヒスの観測は重要である。

まず LF ヒスの出現の特性をみると、LF ヒスは後述される Leaked AKR の観測される領域より、低緯度側から観測され、更にオーロラオーバルより高緯度すなわち Polar cap の中まで広く観測される(第7図参照)。またそのスペクトラムは微細な構造をもたず、時間変動もゆるやかである。第8図には第5図の 00:31:10 UT とその4秒後の 00:31:14 UT のパワースペクトラムを示すが、オーロラ粒子と相関の良い Leaked AKR は強い強度をもって時間変動も激しいのに比べ、LF ヒスはほとんどそのスペクトラムの変化が



第5図 極域で観測されたプラズマ波動の典型例。衛星は夕方側北極域を低緯度(サブオーロラ域)から高緯度(polar cap)へと飛翔したが、VLF帯では polar chorus からオーロラヒスへと移り変わり、HF帯では LF ヒス、漏洩型 AKR、UHR モード波動、地球ヘクトメータ波が受信されている。

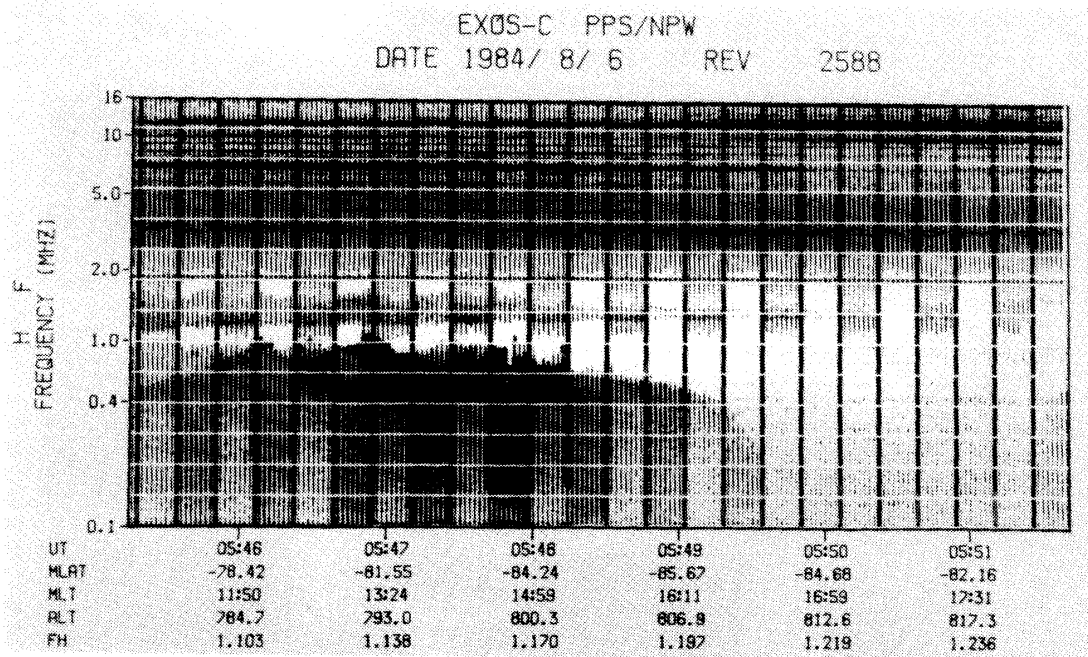


第6図 第4図のダイナミックスpektrumを説明するための模式図.

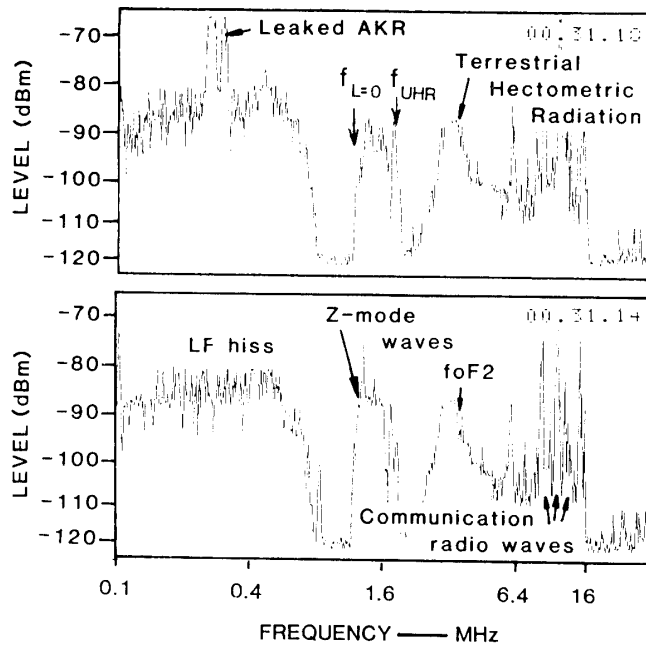
ないことがわかる。こうした特性はそのエネルギー源となる粒子のエネルギー Spektrum 及びその粒子の降下する際の時間変動の様相と密接に関係していると考えられる。

従来のヒスの研究においてはヒスの発生域は衛星高度以上のレベルにあり下方に伝搬してきているものとされているが、EXOS-C の NPW の偏波の観測からも、上方から下方へと伝播することが立証された。第9図に LF ヒスの偏波データを示すが、上段が衛星の spin 軸から見たときの左廻り、下段が右廻り偏波を示す。17:59 UT から 18:02 UT の polar cap の中で周波数 200 kHz~900 kHz の帯域で LF ヒスが観測されており、このときの偏波は明らかに左廻り偏波が強く観測されている。この観測が行なわれた時の衛星の spin 軸、磁力線(北半球・昼側)、及び観測された波動の偏波のセンスを模式的に第10図に図示してある。この状況で観測された LF ヒスはホイッスラーモード(R-Xモード)であることから、LF ヒスは上方より下方に伝搬してきていると結論される。

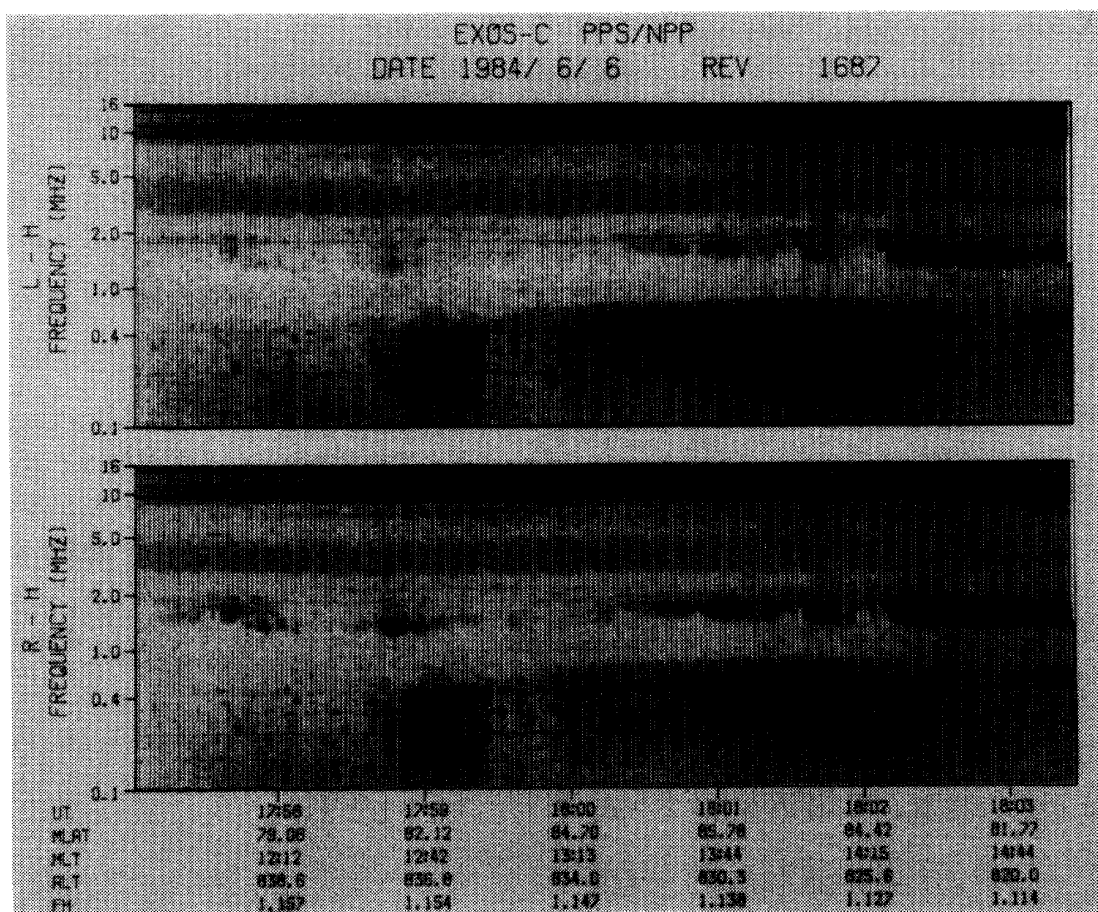
一方 EXOS-C が観測した LF ヒスの周波数は時には衛星の位置での電子サイクロトロン周波数に極めて近い上限周波数をもつこともある。すなわち、降下電子によって励起されるオーロラヒスの発生域は高度 400~800 km まで延びていることが明らかにされた。



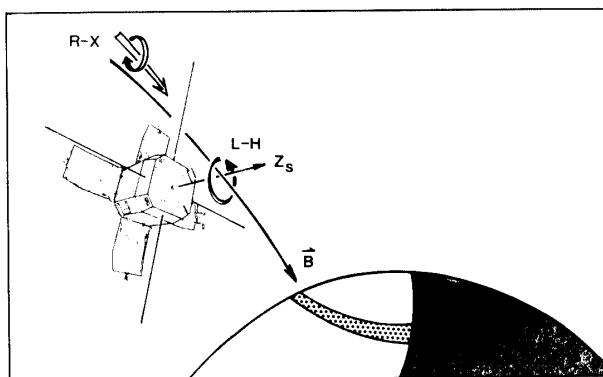
第7図 昼側のポーラキャップ域で観測された LF ヒス。電波が 100 kHz から 1 MHz の広い周波数帯域にわたって放射されている。



第8図 第5図における 00 h 31 m 10 s 及び 4 秒後の 00 h 31 m 14 s のスペクトラム。leaked AKR の激しい変動に比べ、LF ヒスのスペクトラムはほとんど変化しない。また同時に、 $f_{L=0}$ と f_{UHR} の帯域に UHR から Z モードの波動と、 f_oF_2 がその帯域の肩側にもつような地球ヘクトメータ放射のスペクトラムがみられる。



第9図 偏波計測によって得られた LF ヒスの偏波スペクトラム。
左旋波 (L-H) が卓越して受信されている。



第10図 第9図の結果を観測する時の衛星スピン軸, アンテナ及び
磁力線の相対的關係。この状態で R-X モード波としての
LF ヒスが左旋波として観測されたことから, 受信された
LF ヒスは上方より下方へ伝搬していることが示される。

第5図（または6図）下段には極域における VLF 波動ダイナミックスpektrumを示すが、VLF ヒスは上述の LF ヒスと連続的にスペクトラムがつながっていると理解される。一方この VLF ヒスの出現する緯度より低緯度側で周波数 4 kHz 以下にスペクトラムをもつポーラーコーラスが受信されている。このポーラーコーラスから VLF ヒスへの遷移は緯度にして約 3° 以内である。衛星が昼側のオーロラ域を通過する際に見られるこの顕著な現象は、磁気圏赤道域で生じているサイクロトロンレゾナンスタイプの波動粒子相互作用によるプラズマ波動生成域と、電子ビームによる波動励起域との相互の関係を示していることになる。

3-4 UHR モード波動

第5図の典形例に示されるごとく、周波数 1.2 MHz から 2 MHz にわたる領域にバンド構造をもつ連続的なスペクトラムがオーロラ帯をはさんで観測される。この波動はその上限と下限の周波数から UHR（高域ハイブリッド共鳴）周波数から Z モードにつながるブランチの波動であることが SPW の観測から同定された（第8図参照）。またこの波動が同定されたことにより、我々は逆にその場での電子プラズマ周波数 (f_p) を正確に知ることができる。すなわち上限のカットオフ周波数が高域ハイブリッド共鳴周波数 (f_{UHR}) であることから

$$f_p = \sqrt{f_{UHR}^2 - f_c^2}$$

又は下限の周波数が $L=0$ のカットオフ周波数 ($f_{L=0}$) であることから

$$f_p = \sqrt{f_{L=0}^2 + f_{L=0} \cdot f_c}$$

ここで f_c は電子サイクロトロン周波数である。

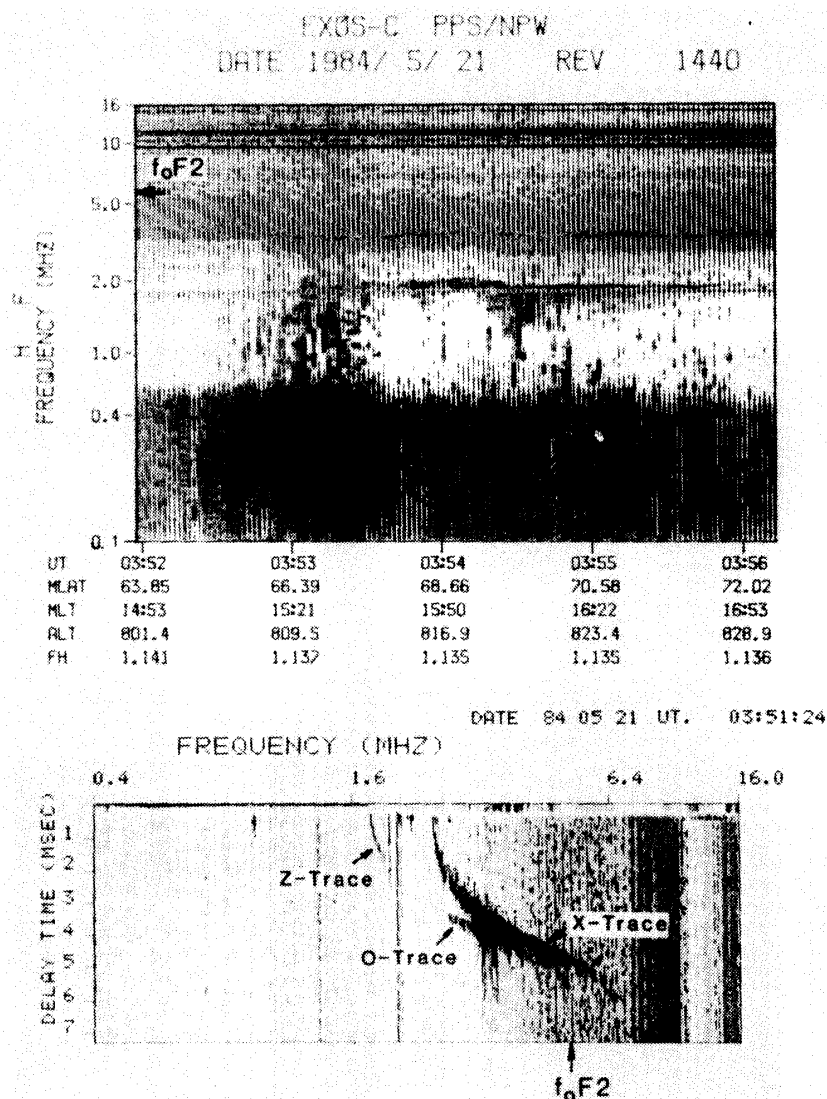
プラズマ波動現象において UHR モード波は非常に重要な役割を果していることが近年の研究で指摘されている[4][5]。実際、地球の AKR 現象を含めて惑星電波の起源が UHR モードの波動であるという事実が明らかにされつつある[6]。EXOS-C 衛星の観測の成果の1つは、この UHR モードの波動が電離層の中においても極めて通常的にしかも強い強度をもって存在していることを示した点にあると言えよう。

この UHR モード波動がオーロラ粒子によって強く放射されている姿をとらえた例が第5図で示されている。すなわち 00:31 UT 付近において UHR から Z モードにわたる波動が非常に強く受信され、同時に leaked AKR（後出）の強いスペクトラムが出現している。これはオーロラ粒子加速域で加速された電子が AKR を放射し、そのリーク成分が受信される（後章参照）と同時に電離層に降下して来た電子ビームによって UHR モード波が励起されていることを物語っている。またこのオーロラ粒子加速域の直下をはさんで低緯度側と高緯度側の両方に広く UHR-Z モード波が観測されているが、これは電離層の中に UHR-Z モード波が広く充満していることを示している。しかしこの広く分布している UHR-Z モード波がオーロラ域に起源をもち電離層に trap されている成分であるか、あるいはこれまで明らかにされていない弱い電子ビームの降下が広く分布しているのかは今後の研究で明らかにしていかなければならない。

3-5 地球ヘクトメータ波放射

前節で地球を含めた惑星電波放射においてその起源となる UHR-Z モード波が極域電離層に充満している事実を明らかにしたが、本節では、まさにこの UHR-Z モード波を起源とする、これまでに報告されていない地球電離層で生じている電波放射について述べる。

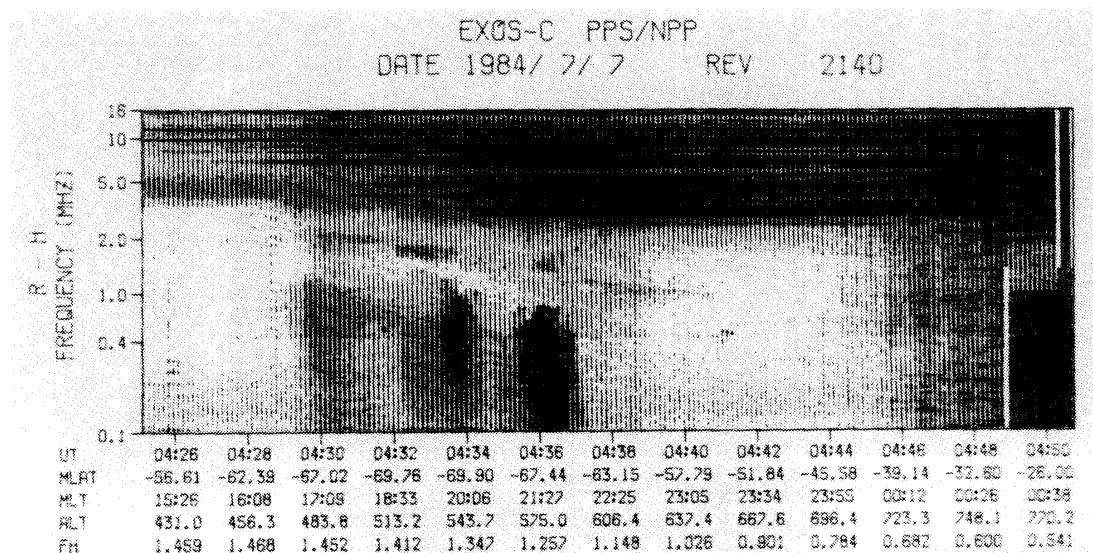
典型的なスペクトラムが第5図に示されるが、周波数 3 MHz~5 MHz にわたるバンド



第11図 極域で観測される地球ヘクトメータ波の放射 (4 MHz~6 MHz) と leaked AKR (100 kHz~600 kHz) (上段)。地球ヘクトメータ波の放射の帯域にみられる上限の肩の部分の周波数は電離層の f_0F_2 に対応することが、直前に計測されたサウンダーデータから示される (下段)。強い AKR が観測される時 (03 h 53 m 付近) には、地球ヘクトメータ波放射と Z モード波、更に leaked AKR のスペクトラムがつながることがある。

構造の波動がみられる。この周波数は衛星の局所的プラズマ特性周波数あるいはその高調波のいずれとも対応していない。またその上限の周波数は電離層の O モードの突き抜け周波数に近いことが SPW データとの対比から明らかになった。具体例を第 11 図に示す。下段のイオノグラムは上段のダイナミックスペクトラムの観測の直前のものであるが、イオノグラムから求められた f_oF2 周波数は、今我々が注目しているバンド構造の波動の上限の周波数に相当していることがわかる。更にこの事実を裏づける例として、この波動の周波数が次第に減少していくとき、その上限の周波数に接しながら地上の通信波が衛星によって受信されてくることを第 12 図に示す。

以上のことから観測されている波動は電離層 F 2 ピーク付近で生成された O モードの波動と考えられる。そこで次のような仮説をたててその放射の機構の説明を試みる。すなわち、オーロラ粒子によって励起される UHR-Z モードの波動は前節でみたごとく極域電離層には広く充満している。この波動はこのままでは自由空間を伝搬する電磁波とはなり得ないが、極域 F 2 ピーク付近には、極域に特有の spread F が存在し、そこでの電子密度の不規則構造によって効率良く O モード電磁波にモード変換が行なわれ、地球上方へ伝搬する電磁波となる。この仮説を傍証する事例として、第 11 図で示される局所的 UHR-Z モード波と今注目している現象とがスペクトラムの上で 1 つに交わる現象が挙げられる(図中 03:53 UT 付近)。これは spread F が非常に発達したときにはしばしば衛星の高度までその擾乱域が発達することがあるが、ここに挙げた例は、その様な状態にあったために UHR-Z モード波の O モードへの変換が生じている領域が衛星の高度まで及んだためと考える。



第 12 図 地球ヘクトメータ波放射が電離層 F 2 ピーク付近で生成されていることを示す例。地球ヘクトメータ波の周波数が次第に減少するとき、その周波数変化に応じてそれまでマスクされていた地上からの通信波(平行状の多数の線スペクトルとして示される)が表われてくる。

以上に記したプロセスは、どちらかといえば木星電離層で生ずるデカメータ波の放射機構[4]と同一のものであり、上記仮説を実証することの意義は極めて大きい。今後更に詳細な検討と同時に観測から得られるスペクトル強度からモード変換の効率を求める事を進める必要がある。

4. Leaked AKR

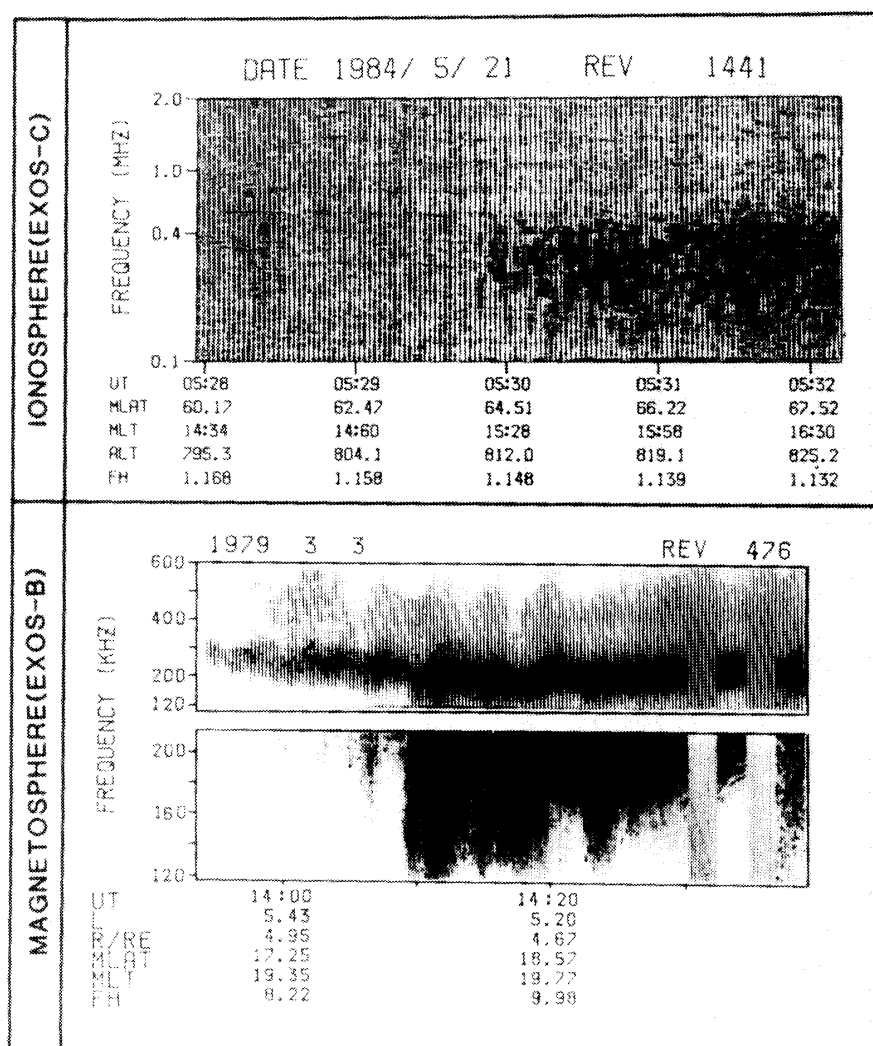
オーロラキロメートル電波は 200 kHz~300 kHz にピークをもつオーロラの発生と呼応して生れるきわだって強いバースト性電波として知られている。この電波は宇宙空間に向って電波を放射している事は、放射されていて、地球を遠く周回する衛星によって観測された[7]。地球が宇宙空間に向って 1960 年代の終りにソ連のグループが手がかりをつかんでいたが、その全貌が明らかになったのは、アイオワ大の Gurnett[8]の研究であった。その後アイオワのグループにより多くの確認が行なわれた。しかし、その電波の放射機構は確立されていなかった。いくつかの理論が提出されている中で、じきけん衛星 (EXOS-B) の観測のデーターはオーロラキロメートル電波の放射の中に L-0 モード電波[6]が存在することを示していた。これは少なくとも、オーロラキロメートル電波放射の中にはモード変換[9]プロセスが適用できる[10]ものがあるという事を実証するものである。

こうした背景にあって、最高高度 850 km の地球周回軌道で観測する EXOS-C 衛星が、オーロラキロメートル電波を受信するかいなかは大変興味ある問題であった。もし受信されれば我々が既にオーロラロケット観測等でその片りんをつかんでいた事が事実として認められる事になり Leaked AKR の存在が実証される事になる。観測事実は Leaked AKR を示す多数のデーターを示す事になった。第 11 図は 1984 年 5 月 21 日に 1440 周回 (Rev 1440) で観測された高周波部のダイナミックスペクトルである。図の最も暗い部分が、最も強度の強いところで、この例は 4 分間のデータの display であるが、ここには 100 kHz から 500 kHz の帯域にひとまとまりのスペクトルが示されている。

この放射が 300 kHz 付近にそのスペクトルの中心をもち 100 kHz~400 kHz の領域をカバーする周波数帯域に広がる事は即、EXOS-C の観測点では波動はホイッスラーモードである事を示している。ホイッスラーモードとして伝播する波動の起源は二種類ある。その一つはホイッスラーモードとして直接生れるものであり、他の一つは UH 波 (または UHR 波) として生まれたプラズマ波動が、Z モード波を経由してホイッスラーモードに変換されるものである。

ダイナミックスペクトルからこの両者の区別を見いだすのは困難な点も多いが、第 13 図の例にみられるように地球外の衛星で観測したダイナミックスペクトルと同等のスペクトルが得られている事が一つの手がかりとなる。つまり、そのスペクトルは 200 kHz 以下で急激に弱まり、それ以下の周波数域まで連続には続いていない。もし、ホイッスラーモード波として直接電磁波放射が生れた時には、発生域はかなり電離層に近いところにあり、100 kHz 付近でスペクトル強度が低下しスペクトルが不連続になる理由がない。

こうした第 11 図及び第 13 図に示す例では、地上に Leak してくる AKR と断定される事になった。この種の現象は EXOS-C のダイナミックスペクトルの中に多数例みつかっ



第13図 EXOS-Cで観測されたAKR(上段)と磁気圏の中で観測(じきけん衛星)されたAKRのダイナミックスペクトラム(下段).

ているが、UH波として発生しているプラズマ波動が、ホイッスラーモード波に変換される過程は、同時にこのUH波が、宇宙空間にescapeする事と同等となる。すなわちUH波がZモード波に変わったのち、それがホイッスラーモードに変換するプロセスと、L-0モード、あるいは時に、R-Xモード電磁波に変換する過程は同時に発生する性格のものであるからである。

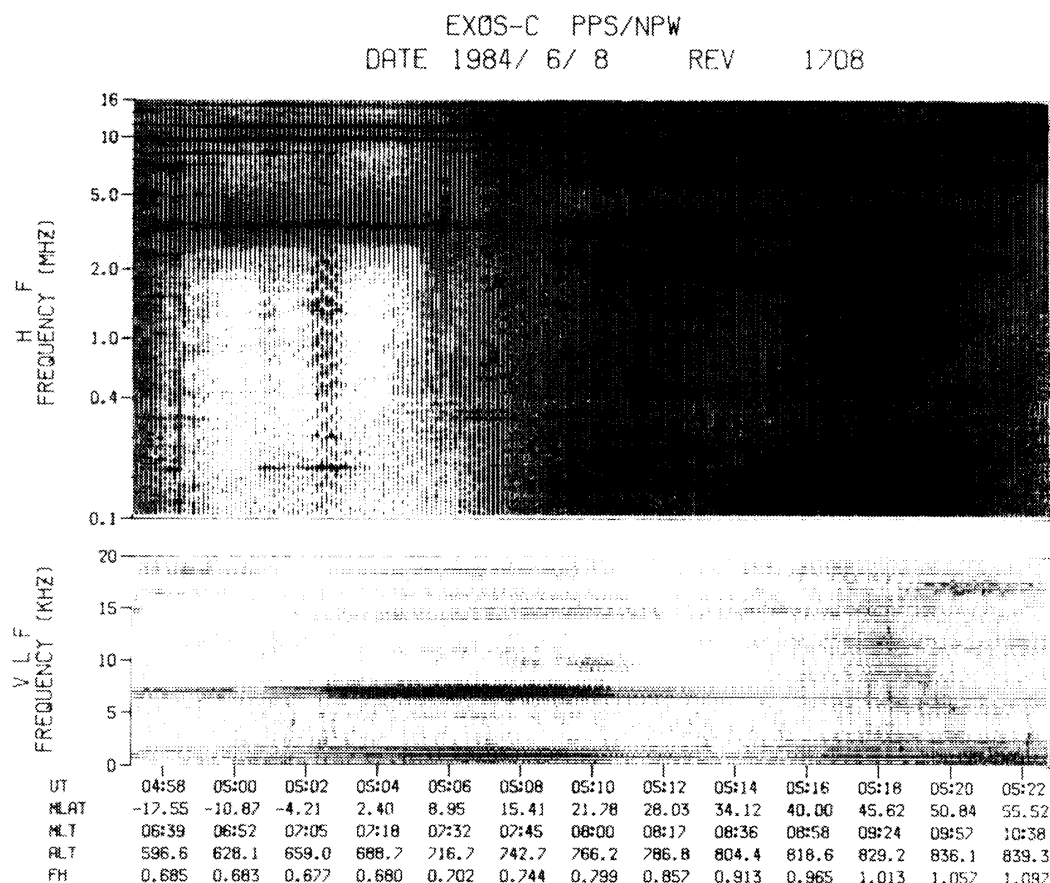
5. 静電的衝撃波

衛星が宇宙空間プラズマ中を運動する時、プラズマとの相互作用にもとづく種々の影響がある。その一つで最もポピュラーなものは、プラズマ中に生ずる航跡効果(Wake Effect)

であるが、これは、飛翔体の進行方向と反対の領域に生ずる低いプラズマ密度の領域として知られるものである。

こうした航跡効果以外に、EXOS-C 観測では、飛翔体の運動によって惹起されたと結論される波動現象が観測された。第14図に示すダイナミックスペクトルはかなり広い周波数帯にわたって、しかも、地球を1/4~1/2周する程に広範囲の領域で高周波が存在している事を示している。

この電離層電界はかなり強度の大きいもので、Tip to Tip 40 m のアンテナを伸展した直後から観測されているが、これはさらに、パドルの先端に装着されたインピーダンスプローブでも検出される。第15図にインピーダンスプローブの出力の様子を示す。特に、上図は Tip to Tip 40 m のアンテナ伸展前のインピーダンス特性計測値であるがここに示されているものは典型的なシース共鳴と UHR (高域ハイブリッド共鳴) である。その他のインピーダンス出力値の微少なゆらぎは4ヶの VCO (Voltage Control Oscillator) の切り換え時に生ずる微妙なレベル変動で、実際のインピーダンス値のゆらぎではない。ここで、Tip to Tip 40 m のアンテナの伸展後は下図にみられるように多くのピークが発生する。



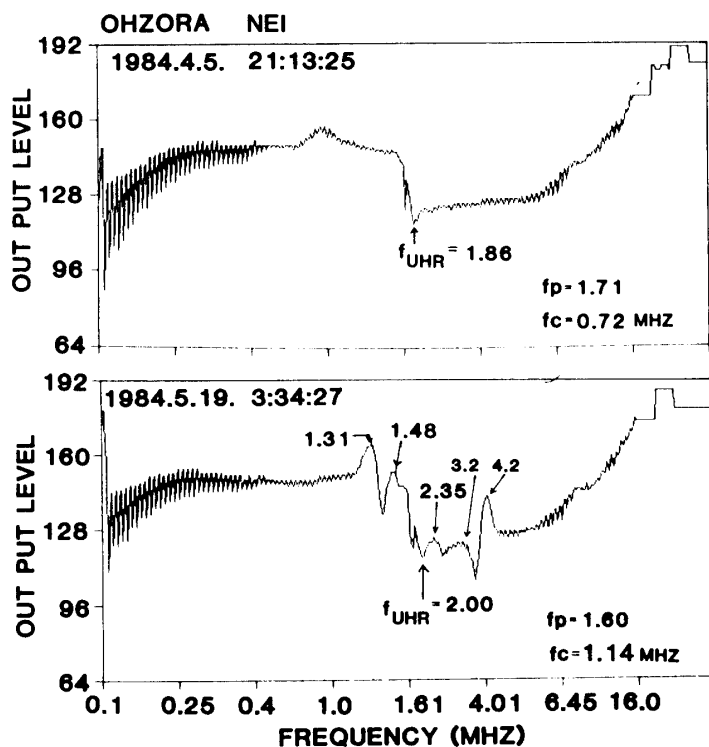
第14図 静電的プラズマ衝撃波のダイナミックスペクトラム。広い周波数帯にわたって強いスペクトラムを示し、磁気緯度20°から50°までの広い領域で生じている。

このピークの周波数関係をさらに明らかにするため、ピーク周波数 f/f_c を f_p/f_c 値に対してプロットしたものが第16図である。この様子は Plasma 共鳴の問題の Sequence of diffuse plasma 共鳴と極めて類似していることが判明する。

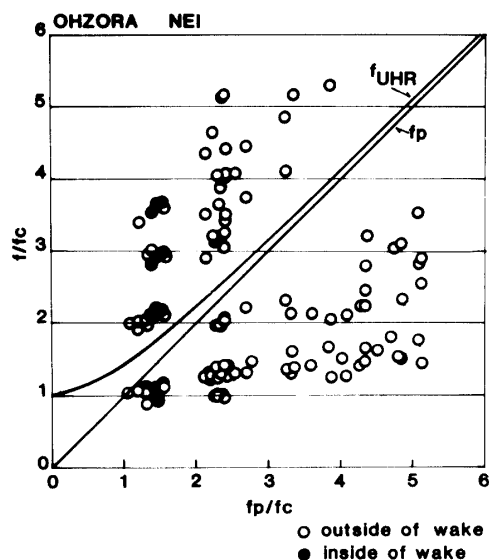
Sequence diffuse Plasma 共鳴と、インピーダンス計測に見られる多くの共鳴のピークを対比する議論にはもう一段考慮しておかなければならない点がある。それは、インピーダンス値は単に印加された電圧への応動として電位を測定するのが常態であるが、この場合、明らかに外から非常に強い電界が印加されていることによって、本来のインピーダンス計測とは異なる副次的な効果となっている点である。

したがって、このピークはそこに存在する静電的プラズマ波動を受けていることになる。すると、EXOS-C の周辺で生じているプラズマ波動は、diffuse plasma 共鳴の時に問題となった非線形性[11]が明瞭となる。この事は発生している波動が、非線形現象を惹き起こす程に大きい事を示している。

第14図に示されているように、この EXOS-C の運動によって惹き起こされる波動は軌道位置を緯度で示す時、およそ $20^\circ \sim 65^\circ$ の範囲になる。軌道傾斜角 75° の EXOS-C ではこの範囲の緯度は衛星の進行方向がおよそ磁力線に直角方向に近くなる。この事は、衛星の運動によって Bernstein 波及至は Electrostatic Electron Cyclotron Harmonic 波を基調



第15図 インピーダンスプローブの掃引波形。上段は tip to tip 40 m のアンテナ伸展前、下段はアンテナ伸展後の掃引波形を示す。アンテナ伸展後にはパドルの先端に取り付けられたプローブに静電的プラズマ波動が重畳している。



第 16 図 インピーダンスプローブで検出された波の周波数とその場のプラズマ周波数との関係. diffuse plasma 共鳴と良く類似している。

とする巨大振巾波を発生している事を示唆するものである。

特にこの巨大振巾波は、ソリトンからあるいは弱い衝撃波にまで成長している事が、この中に発生している Weak Turbulent 波の様相からもうかがえる。

6. 結 論

EXOS-C (おおぞら) 衛星に搭載された科学観測は、光学系及びプラズマ系の二つの大きな範疇にわけられる多項目よりなるが、そのうちで、プラズマ波動を総合的に観測する目的で搭載されたのがプラネタリープラズマサウンダーである。

このうち特に自然プラズマ波動観測の成果を集中的にここで述べたが、従来地球周辺で多くのプラズマ波動、電波等の観測が行なわれてきていたという背景に立っているが、なお単にそれらの成果の確認といった範囲にとどまらぬ新しい発見と、より詳細でその発生の物理が明確になるような事実が得られる事になった。

発見された事実は

1. 漏洩型オーロラキロメートル電波
 2. LF ヒスの広範囲にわたる分布
 3. 電離層上部でのプラズマ波動から電磁波へ変換過程の生成
 4. オーロラ帯粒子降下による静電的プラズマ波動の励起
 5. ブラジル地磁気異常帯でのパルス状粒子降下現象
- であり、新しくそのメカニズムが解明されてきたものは
1. 電離層中の静電的プラズマ衝撃波

2. オーロラヒスとコーラス帯の分離に関する明確な地域分布である。

EXOS-C は順調に作動しており、こうした点に関するデータが多量に集積される事により今後一層その事実が明確にされる事になる。

謝 辞

本研究は宇宙科学研究所 EXOS-C チームの活動によって成功裡に実施されたものである。プロジェクトマネージャーの伊藤富造教授はじめ、M-3 S-4 ロケット実験にたずさわった宇宙研の全てのスタッフの方々に心より感謝する次第である。

参 考 文 献

- [1] Oya, H., T. Takahashi, and A. Morioka, Electron Density Distribution and Particle Precipitation in South Atlantic Anomaly ; Report on Gyro-plasma Probe Observation Installed on TAIYO, J. G. G., **31**, 95, 1979.
- [2] Oyama, K. I., and Schlegel, Anomalous electron temperature above the South American magnetic Field anomaly, Accepted to P. S. S., 1984.
- [3] Gurnett, D. A., A Satellite Study of VLF Hiss, J. Geophys. Res., **71**, 5599, 1966.
- [4] 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, 1974.
- [5] Oya, H., and H. Miyaoka, Theory on effects of resonance scattering conversion of the planetary radio waves due to turbulent plasma, Accepted to Radio Sci., 1984.
- [6] 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**, 6183, 1983.
- [7] Benediktov, E. A., G. G. Getmantsev, N. A. Mityakov, V. O. Rapoport, and A. F. Tarasov, Relation between geomagnetic activity and the sporadic radio emission recorded by the Elektron satellite, Kosm. Issled, **6**, 946, 1968.
- [8] Gurnett, D. A., The earth as a radio source : Terrestrial kilometric radiation, J. Geophys. Res., **79**, 4227, 1974.
- [9] Oya, H., Conversion of electrostatic plasma waves into electromagnetic wave : numerical calculation of dispersion relation for all wavelengths, Radio Sci., **6**, 1131, 1971.
- [10] Benson, R. F., Source mechanism for terrestrial kilometric radiation, Geophys. Res. Lett., **2**, 52, 1975.
- [11] Oya, H., Verification of Theory on Weak Turbulence Relating to the Sequence of Diffuse Plasma Resonances in Space, Phys. Fluids, **14**, 2487, 1971.