

# 科学衛星JIKIKEN (EXOS-B) VLF ドップラー観測 (DPL) \*

橋本弘蔵\*\*・木村磐根\*\*

## JIKIKEN (EXOS-B) VLF Doppler Shift Measurement (DPL)

By

Kozo HASHIMOTO and Iwane KIMURA

**Abstract:** This paper is concerned with the observation system and preliminary results of a Doppler shift measurement of NWC signal by means of an instrument named "DPL" on board the EXOS-B satellite which was launched on September 16, 1978. Main purpose of this measurement is to detect the ionization ducts in the magnetosphere. From actually observed Doppler shift, it is found that the signals were mostly nonducted. Signal intensity and noise intensity at 22.3 kHz have been also observed by DPL using two pairs of long dipole antennas, 103 and 70 m tip-to-tip. Capacitance of the antenna has been measured by imposing a constant current at 22.3 kHz to the antennas. From this capacitance measurement, plasma-pause crossing of the satellite has been detected.

### 概 要

本論文では、1978年9月16日に打ち上げられたEXOS-B衛星に搭載されたNWC局VLF信号(22.3 KHz)のドップラーシフト観測装置(DPL)の観測システム、および初期の結果について述べる。本装置の主目的は、磁気圏に存在する電離ダクトを検出することである。同時に、2対の103 m、および70 m長のダイポールアンテナにより、22.3 KHzにおける信号強度および雑音強度を測定する。アンテナ容量も、22.3 KHzの定電流源をアンテナに加えることにより測定される。この方法により衛星のプラズマポーズの通過が検出された。

### 1. 目 的

この実験は周波数の安定な標準VLF局(オーストラリアのNWC局, 22.3 KHz)の電

---

\* 宇宙研特別事業費による研究論文

\*\* 京都大学工学部

波を衛星上で受信し、そのドップラーシフトや信号強度を測定することにより、磁気圏プラズマパラメータやダクトに関する情報を得ようとするものである。VLF局から発射された波は磁気圏をホイスラーモードで伝搬し、衛星で受信されるドップラーシフトは波の伝搬ベクトル方向、媒質の屈折率および衛星の速度ベクトルから決定される。一方、衛星の速度ベクトルは衛星の軌道から決定されるので、ドップラーシフトは波の伝搬状態を決定する重要な要素である伝搬ベクトル方向と媒質の屈折率に関する情報を与える。

VLF電波が磁気圏を伝わる方法は、磁力線に沿ってできる周囲より電子密度の高い電離ダクトに沿って伝わるダクト伝搬と、そうでないノンダクト伝搬に分けられる。ノンダクト伝搬の場合には、上述の屈折率やドップラーシフトが大きくなるので、ダクトの存在とその大きさを推定することができる。

本実験では、同時に、信号強度測定および22.3 KHz 近傍の定電流源を印加することによってアンテナインピーダンス測定を行い、その結果をPCMテレメータで伝送している。これらの値からまわりのプラズマの状態や電界強度の絶対測定が可能となる。

さらに、ダクトによらない伝搬で共鳴角近傍で伝わる波に対しては、屈折率は電子温度の影響をうけるため、逆に電子温度を知ることができる [1] [2]。

## 2. 装置 [3]~[6]

### 2.1 衛星搭載システム

地上の標準VLF局の一つであるオーストラリアのNWC局(21.82°S, 114.17°E, 磁気的には32.3°S, 183.8°E)の信号を受信する。送信周波数は $22.3 \pm 0.05$  KHzであり、200ボートでMSK (Minimum frequency Shift Keying)変調を行っている。装置のブロック図を図1に示す。ダイポールアンテナで受信された信号は、プリアンプ(入力インピーダンス数100KΩ)を通り、メインアンプで $\pm 100$  Hzに帯域制限される。入力信号範囲は約 $0.5 \mu V \sim 1 mV$ である。さらに検波器(DET)、0.1秒の時定数の積分回路とHighとLowの2段階の利得切換回路を経て、8ビットにA/D変換され、入力信号レベルとして、

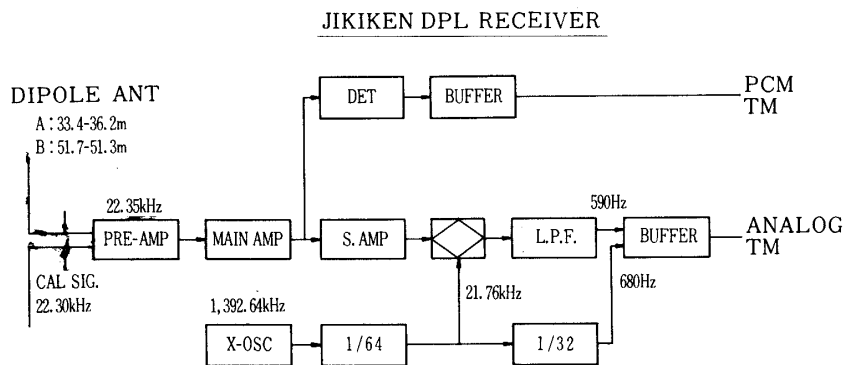


図1. DPL衛星搭載システム

PCMテレメータで伝送される。入力信号レベルとA/D変換出力の関係は直線的で、 $0\text{ dB} = 1\ \mu\text{V}$ として、利得がLowのとき、 $60\text{ dB}$ で出力は230, Highのとき $30\text{ dB}$ で166となる。利得切換は原則として自動で行われ、ヒステリシスを持たせてあるが、入力が約 $32\text{ dB}$ の時に行われる。入力短絡時、ノイズレベル出力は約 $0.5\ \mu\text{V}$  (A/D出力で4~5)となる。

メインアンプの出力は飽和アンプ (S. AMP) にも入り、混合器で $1392.64\text{ KHz}$  の水晶発振器 (X-OSC) より64分周された $21.76\text{ KHz}$  の局発信号を用いて、 $22.35\text{ KHz}$  の信号は $590\text{ Hz}$  のビート信号に周波数変換される。一方、局発信号はさらに32分周されて $680\text{ Hz}$  のパイロット信号となって、ビート信号とともにアナログテレメータで伝送される。パイロット信号は、後述の地上処理装置で局発信号を再現して、衛星内の水晶発振器の周波数変動を補正するために用いられるものである。

さらに $22.3\text{ KHz}$  近傍の定電流源をアンテナに印加してアンテナに生ずる電圧を測る“CAL”と呼ばれる測定モードがある。これは、プラズマ中のアンテナインピーダンスを測定していることになる。CALモードでは、Measureコマンドを与えない限り自動的に約2.6フレームの間“CAL”，約4フレームの間“観測 (MES)”という割合で行われる。この電圧からプラズマ中でのアンテナインピーダンスが求められ、両アンテナ間の容量に換算して、利得Highのとき $50\text{ pF} \sim 0.005\ \mu\text{F}$ , Lowのとき $0.002 \sim 0.05\ \mu\text{F}$  が測定可能となる。“CAL”のタイミングはフレームとの同期はとれていないが、DPLの入力信号レベルをサンプルするための1フレームに3回のパルスを利用し、8パルスの間“CAL”，12

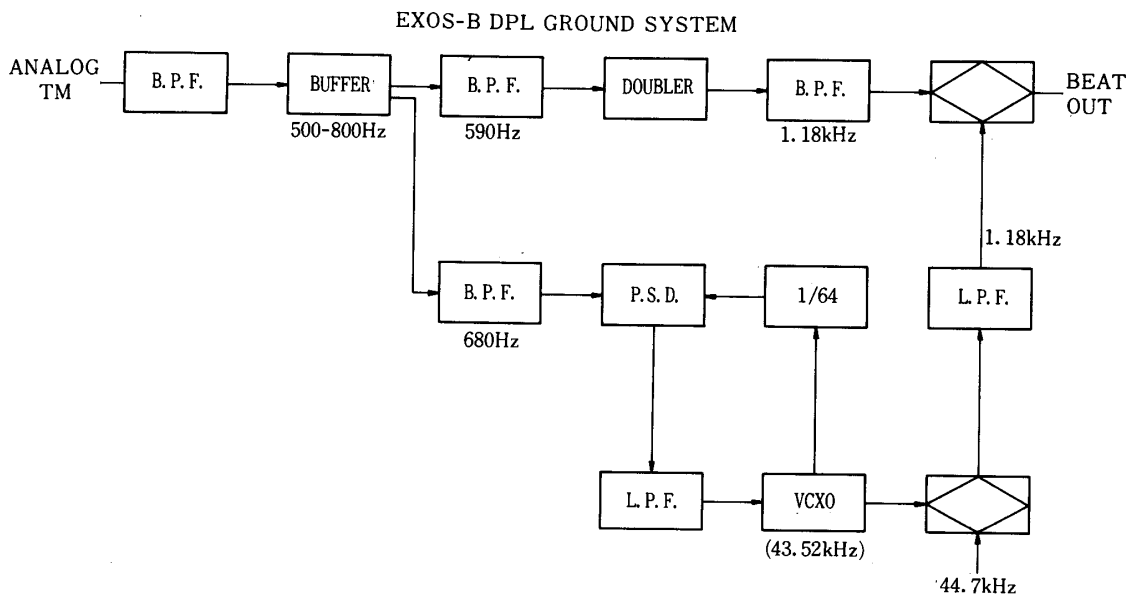


図2. DPL 地上処理システム

パルスの間“観測”となる。これを20パルス毎にくり返す。

## 2.2 地上処理システム

アナログテレメータで送られてくる情報は、前述のようにNWC局の22.35KHzの信号成分に対する約590Hzのビート信号と680Hzのパイロット信号から成るが、これをドップラシフトに相当する周波数への変換処理を地上で行う。このシステムのブロック図を図2に示す。地上に伝送されてくるデータは一たんテープに収録されると、ワウフラッタや速度偏差のためにテープの再生データでは精度よいドップラシフトの値は得られない。そのためReal Timeで処理をしてドップラシフトに変換したものをテープ(データレコーダ)に記録する。図2でバッファを通った信号は、フィルタでパイロット信号とビート信号に分離される。NWC局の信号はMSK方式で変調されているため、顕著なキャリア成分がなく、このまま周波数分析をしても、ドップラシフト値はわからない。そこで2通倍して、約1.18KHzのFSK(Frequency Shift Keying)に変換する。一方パイロット信号は電圧制御で周波数が変化する水晶発振器(VCXO)と位相比較器(Phase Sensitive Detector)等から成るPLL(Phase Locked Loop)に加えられる。43.52KHzのVCXO出力(実際には1392.64KHzの水晶を32分周したもの)は64分周されてPSDに加えられパイロット信号と比較されるので、VCXOの発振周波数は正確にパイロット信号の64倍となり、衛星内で局発周波数の2倍が再現され、局発周波数の変動による誤差は自動的に補正される。この局発信号と地上の安定な44.7KHz(実際には15Hzだけオフセットした44.685KHz)とのビートである1.18KHz(実際には1.165KHz)と、衛星からのビート信号を2通倍したFSK信号との差の周波数を取り、実際のドップラシフトの2倍の値を得る。この信号は、アナログテレメータの原信号と合成されてデータレコーダに記録される。

## 2.3 QLシステム

地上処理システムのドップラシフト出力はQL(Quick Look)システムにも送られ、実時間周波数分析を行いダイナミックスペクトルを表示する。このドップラシフトの値は主として10Hz程度であるが、通常の方法により0.1Hzのフィルタで周波数分析を行っ

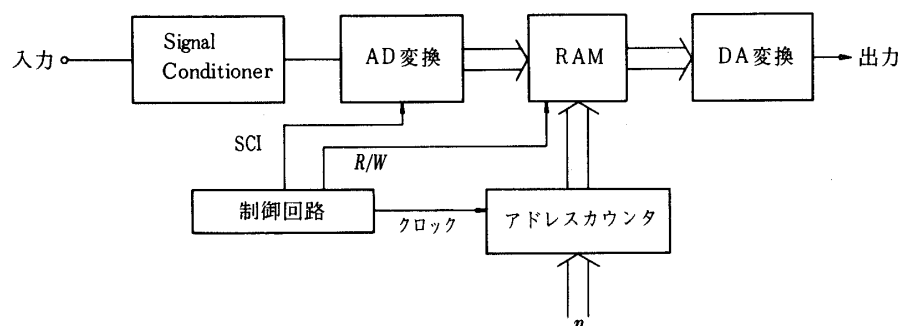


図3. 実時間周波数分析装置のブロック図

たとすれば、1点あたり  $1/0.1 = 10$  秒もの時間を要するので実用的でない。そこで、時間圧縮の手法による周波数分析法を用いる。そのブロック図を図3に示す。シグナルコンデショナによりA/D変換のためのレベル合せとフィルタリングを行った後A/D変換され、 $n$ 語のRAM (Random Access Memory) に順次記録されてゆく。制御回路とアドレスカウンタによって  $n$  語のRAMに書き込まれたデータを  $(n+1)$  語読み出す毎に1語を新しいデータに更新してゆく。これは書き込み時の  $(n+1)$  倍の速さで読み出していることになり、D/A変換すれば、 $(n+1)$  通倍された周波数の信号を得る。こうして通倍(時間圧縮)された信号を分析することにより、 $(n+1)$  分の1の時間で同一の周波数分解能を得ることができる。本システムでは1語8ビットで  $n \leq 4096$  の任意の値が可能であるが、 $n = 4096$  として使用し、周波数範囲  $0 \sim 30$  Hz, 分解能  $0.06$  Hz となっている。

#### 2.4 PCMデータの処理

DPLのデータの処理においては、“CAL”と“観測(MES)”および利得H、Lの自動切換を行っているため、その区別をする必要がある。どちらのモードかは1フレームに1度しか伝送されず、またフレームに同期しているわけでもないので、利得もモードも同一のフレームに挟まれた期間のデータのみをとり出して、“CAL”と“MES”に対応したデータの分離を行っている。同時に各周回の観測開始より終了までの軌道を計算し、磁気緯度(MLAT)、サイクロトロン周波数(FH)、L値(L)とlocal time(LT)を表示する。具体例は4節にゆずる。

### 3. ドップラーシフトの観測

QLシステムで得られた出力例(Rev 43)を図4に示す。NWC局のドップラーシフトのダイナミックスペクトル(下段)およびアンテナ容量(上段上側)、信号強度(上段下方)の測定結果である。同じ周回についてドップラーシフトデータをA/D変換し、計算機による高速フーリエ変換(FFT)を行ったものが図5である。下段には軌道データを示す。図4下段および図5上段において長く続いている  $-2$  Hz 近傍の線は干渉である。1840 UT ころから受信されている  $0 \sim 1$  Hz 付近の信号がNWC局のドップラーシフトである。サイクロトロン周波数( $f_H$ )が  $22.3$  KHz よりも高い地点から受信され始めており、ホイスターモードで伝搬していることがわかる。しかし、信号周波数が  $f_H/2$  以上になるので、エノンダクト伝搬はできず、ノンダクト伝搬をしているものと思われる。図6は、他の周回(Rev 54)におけるドップラーシフトの観測値を斜線でハッチした部分として示したものである。実線および破線は拡散平衡モデルによる仮定された電子密度分布(点線)を用い、種々の wave normal 角(磁気子午面内にあると仮定)に対して衛星で受信されるドップラーシフトの予想値を計算したものである。実線はサイクロトロン周波数  $f_H > 2 \times 22.3$  KHz のとき、破線は  $f_H > 22.3$  KHz  $> f_H/2$  のときを示している。1842 UT ころに  $0$  Hz 近傍のドップラーシフトで観測されたものは、観測時間も短く、ダクト伝搬と考えられる。この場合ダクトの幅は赤道面上に換算して  $300$  Km 程度となり、ダクトの大きさとして妥当なものである。図6上のその他のハッチ領域はドップラーシフトが大きいのか、経過時間が長いので、ノンダクト伝搬によるものだろうと考えられる。

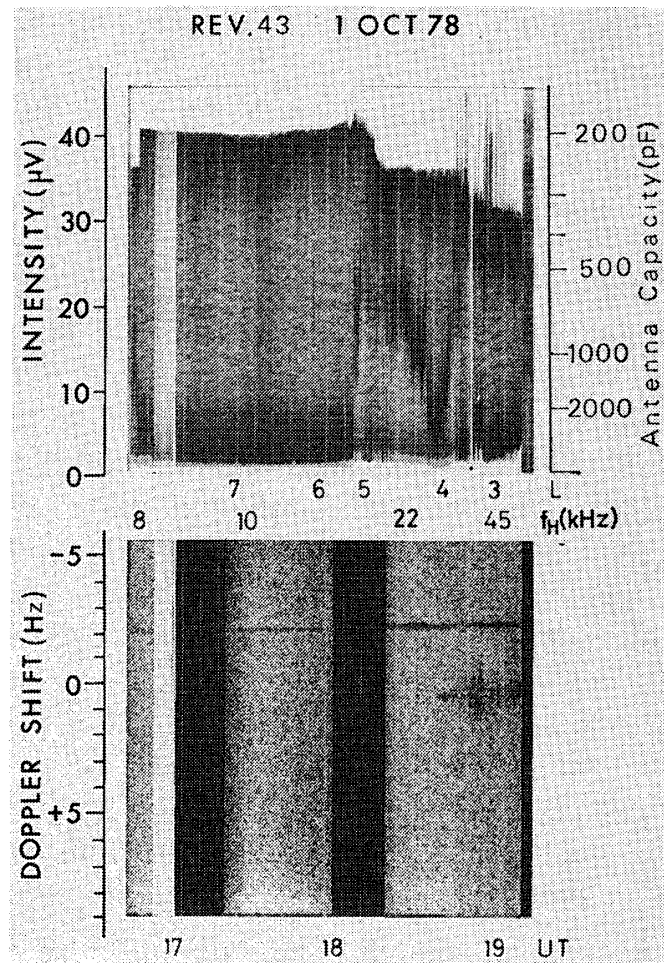


図4. Quick Look データ (Rev 43)

#### 4. アンテナ容量および信号強度の測定

PCMテレメータデータを, QL データとして図4上段に示されたRev 43 について処理したものを図7に示す. 上中下段はそれぞれアンテナ容量 (短い方のアンテナA: 70 m に換算したもの), 22.3 KHz での受信レベル ( $dB\mu$ ), 軌道データを示す. 上段の図で450~500 pF の間の部分はDPLで使用しているアンテナを示しており, 450 pF 相当のレベルのときアンテナB, 470 pF のときアンテナA, 490 pF のときアンテナ接続なしである. ここで, アンテナ容量の換算について述べておく. 図8はアンテナ容量の変化を示したものである. アンテナの長さの相異により容量が急変しているのがわかる. 実際Bアンテナ (103m) の場合, その容量に0.75を掛けるとほぼAアンテナの場合の測定容量と一致する. したがって, データ処理の段階でBアンテナ容量には0.75を掛けABアンテナの区別をせずにすむようにしたのが図9である. また, 0947~1017 UTの間はDPLが観測を行っていないのに不要な線が出ている. そこで図9では, 不要な線を無くす様工夫されて

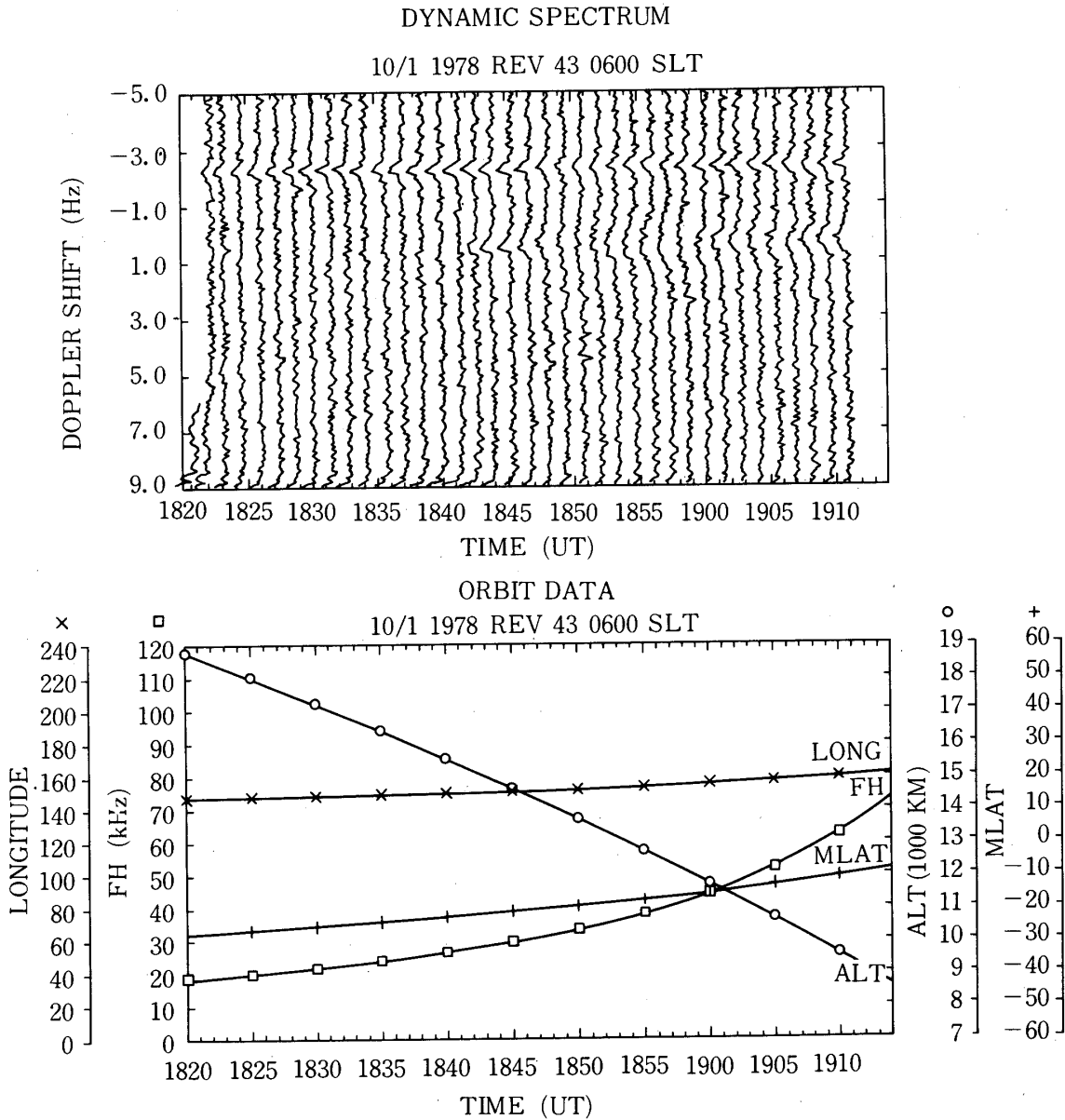


図5. ドップラーシフトのダイナミックスペクトル  
(Rev 43)

いる。この図でみると、アンテナ切換による不連続はかなり取り除かれており、周囲のプラズマの変化を表わしているのがわかる。1230 UTころの容量の減少は、強い信号が受かったためにみえたものである。

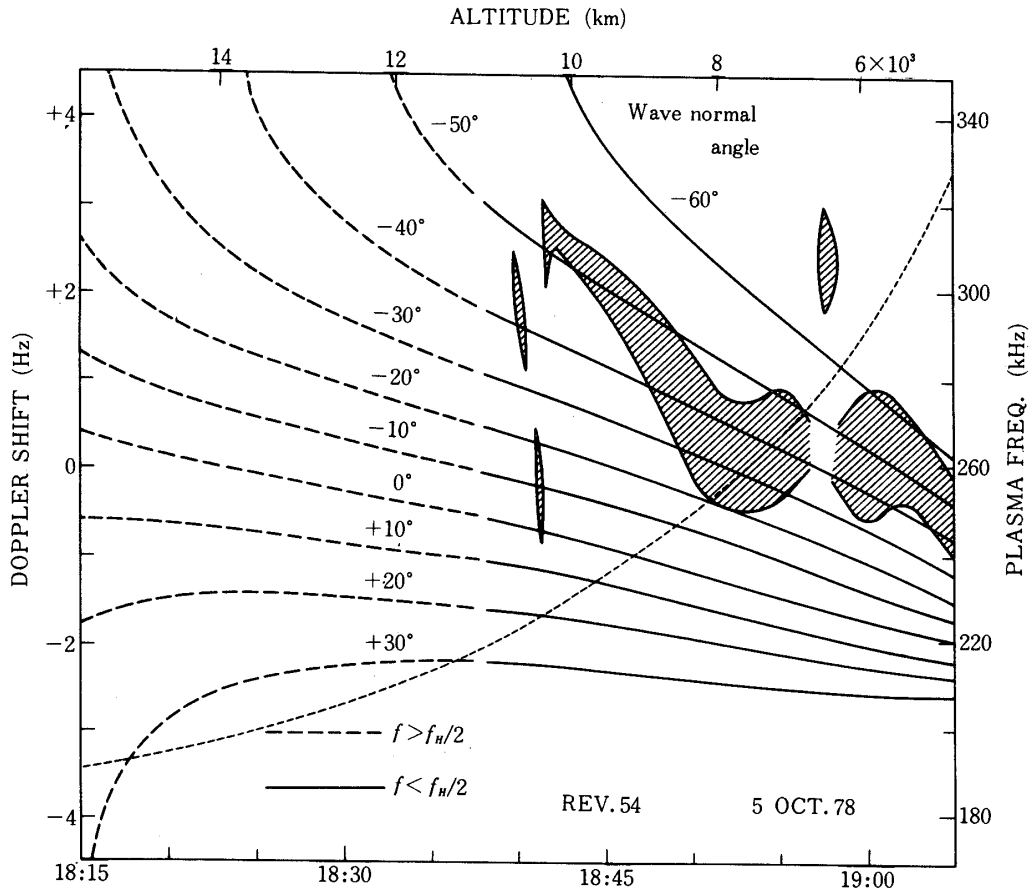


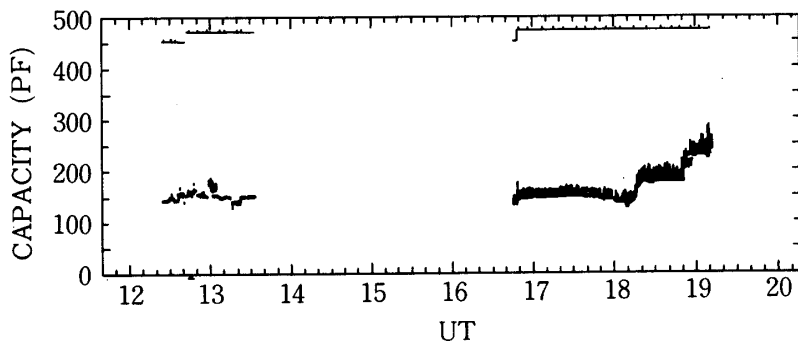
図6. ドップラーシフトの計算値と実測値 (Rev 54)

再び図7にもどり、1810 UT ころにみられる容量の急変はプラズマポーズを通過したことによるものとみられ、その時のL 値は5.3で、local time は4時ころであることが下段の図からわかる。また、 $K_p = 3^+$  であった。1840 UT ころからの信号強度の増加は、図4, 5におけるドップラーシフトの出現に対応しており、ホイスラーモードで伝搬してくるNWC 局の電波を受信したものである。1850 および1910 UT における信号強度はともに  $36 \text{ dB}\mu$  であるが、アンテナ容量はそれぞれ、 $200 \text{ pF}$  であることを考慮すると、アンテナの実効高を35m として電界強度は  $3.6 \mu\text{V}/\text{m}$  および  $3.2 \mu\text{V}/\text{m}$  となる。1805 UT ころに強く受かっているのは、プラズマポーズ外側であり、プラズマ周波数が22.3 KHz (電子密度6個/cc) の近傍でのノイズ、例えばUHR ノイズであろうと考えられる。

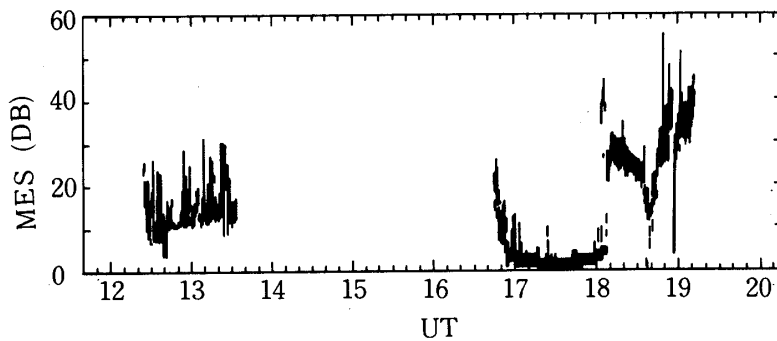


EXOS-B DPL PCM DATA

DATE 10/1 1978 REV 43



DATE 10/1 1978 REV 43



ORBIT DATA

DATE 10/1 1978 REV 43

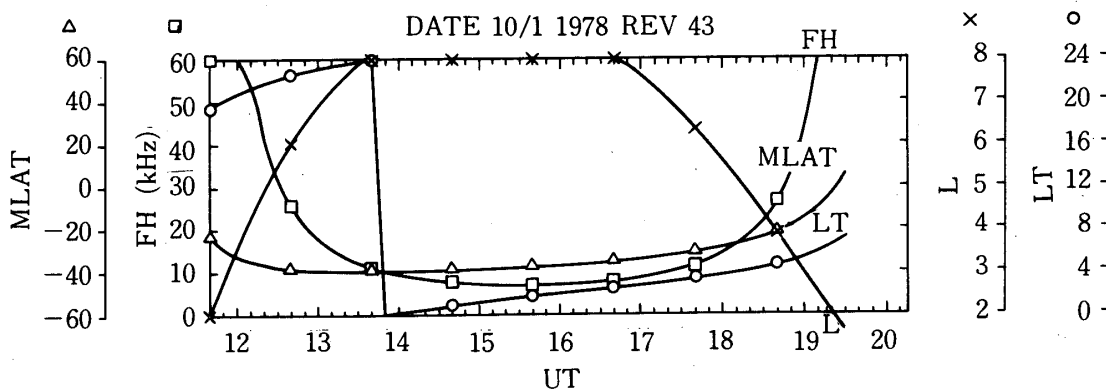


図7. DPL PCMデータ (Rev 43)

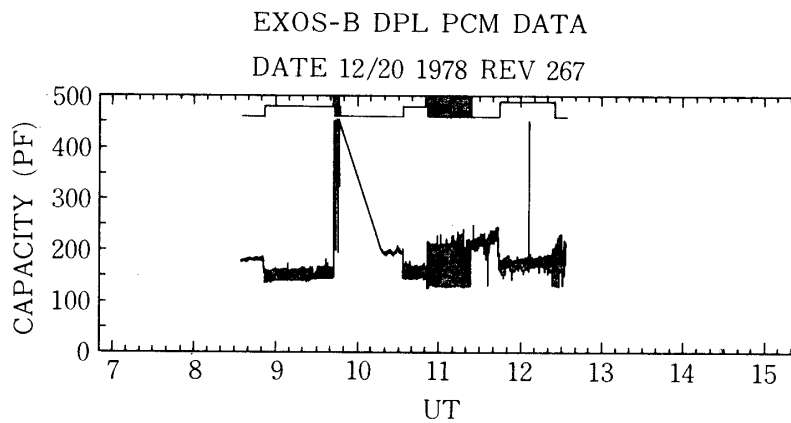


図8. アンテナ容量測定 (Rev 267, 補正前)

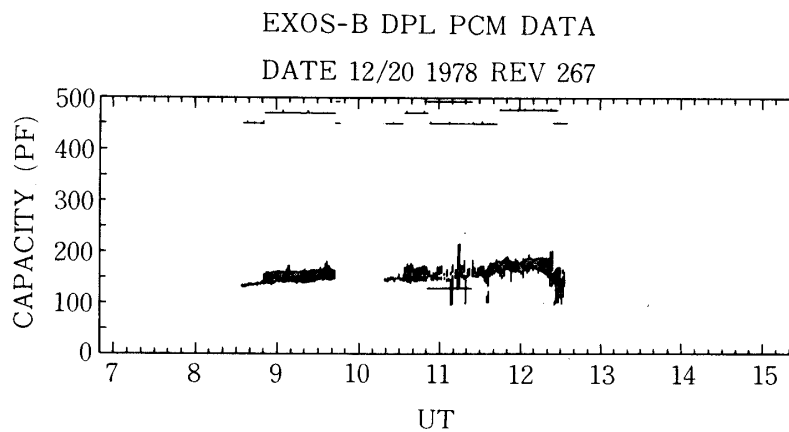
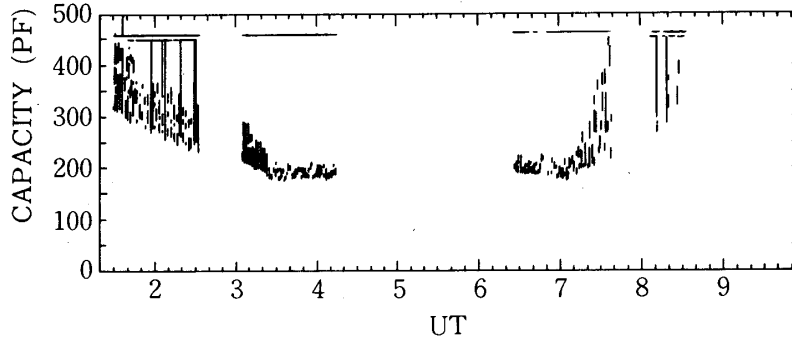


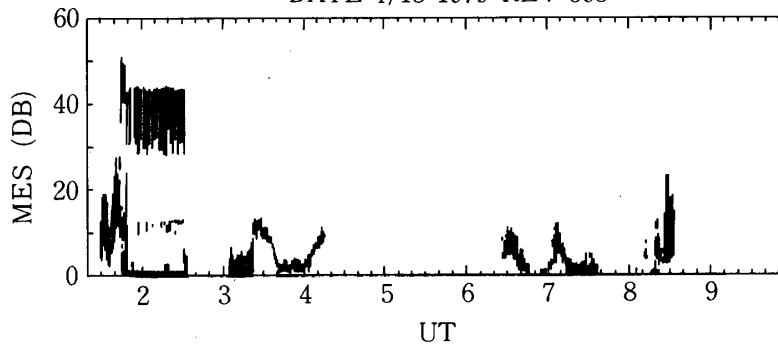
図9. アンテナ容量測定 (Rev 267, 補正後)

EXOS-B DPL PCM DATA

DATE 4/13 1979 REV 593



DATE 4/13 1979 REV 593



ORBIT DATA

DATE 4/13 1979 REV 593

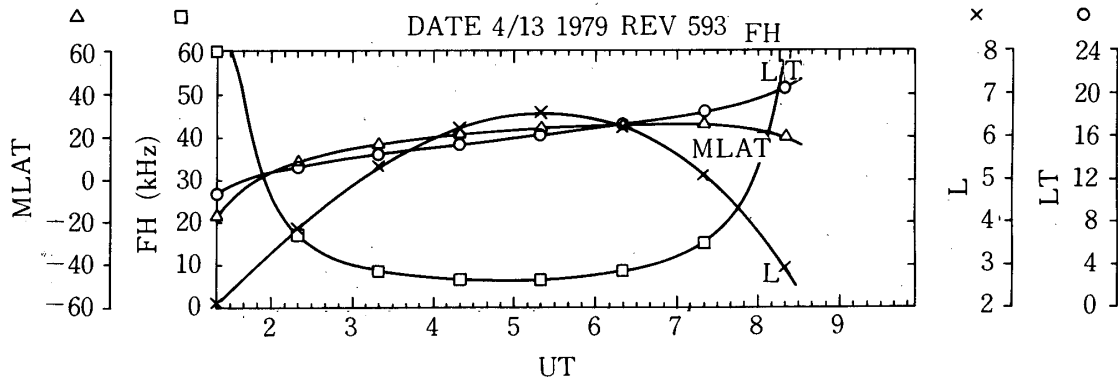
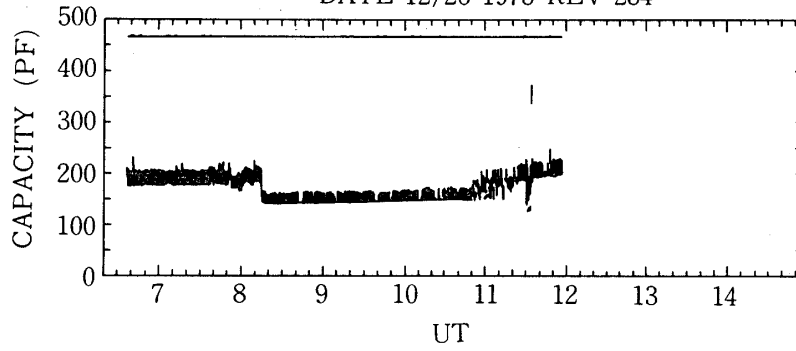


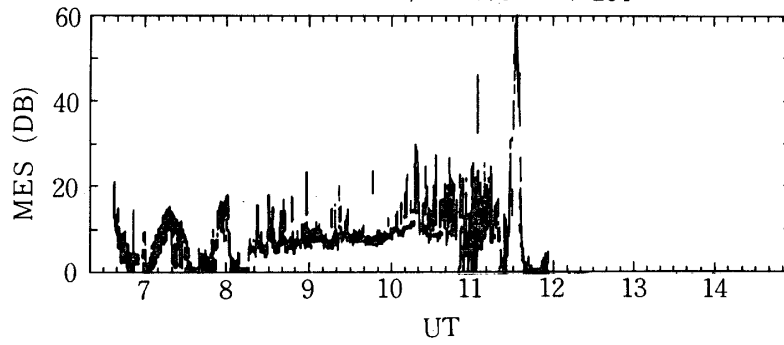
図10. DPL PCMデータ (Rev 593)

EXOS-B DPL PCM DATA

DATE 12/26 1978 REV 284



DATE 12/26 1978 REV 284



ORBIT DATA

DATE 12/26 1978 REV 284

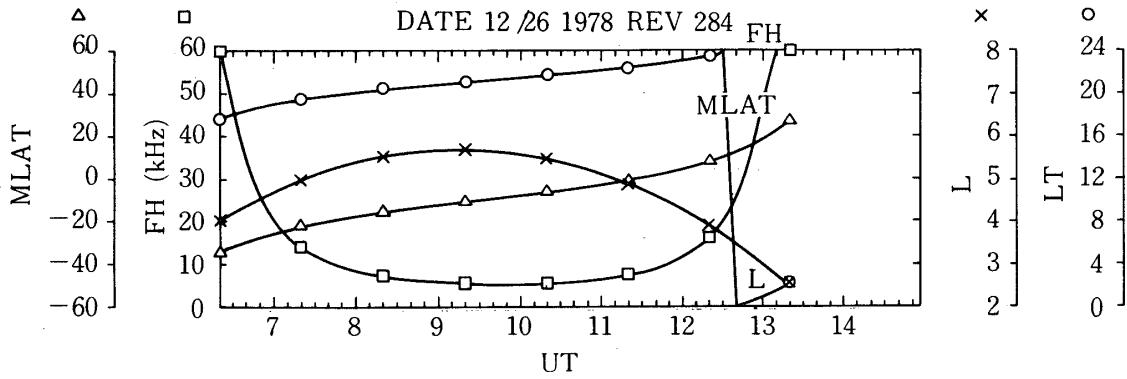


図11. DPL PCMデータ (Rev 284)

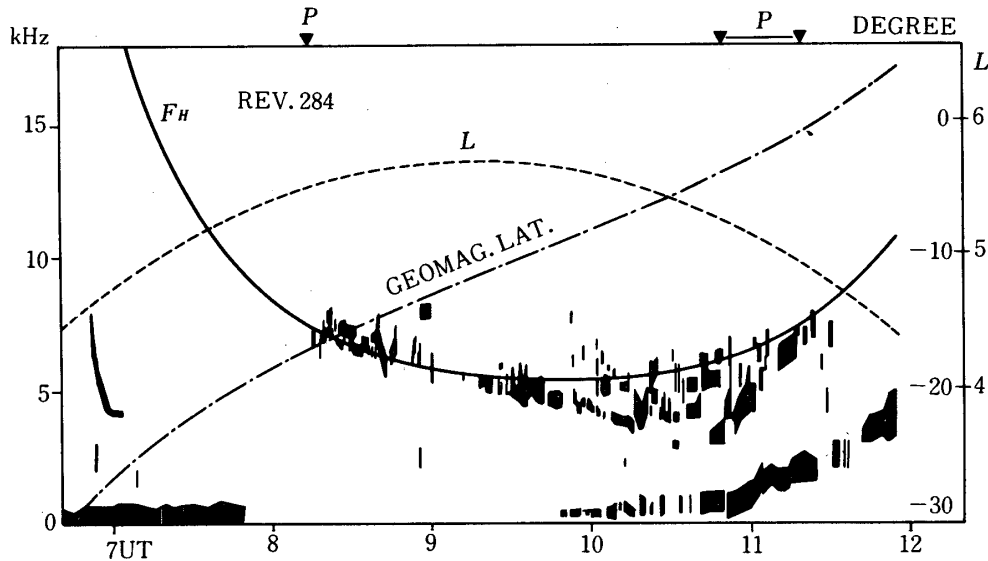


図12. NPW-VによるVLF帯での観測 (Rev 284  
NPW-Vグループの御好意による)

この現象を観測している典型的な例 (Rev 593) を図10に示す. アンテナ容量が少くなっている0325および0705 UTころに受信レベルの増加がみられる. このときL値はともに5.5で $K_p = 2^+$ である. このようにアンテナ容量に急変はみられなくても電子密度が約6個/ccの点の通過が観測されていることになり, プラズマポーズの位置の情報が得られることを示している. このような例は, 多くの周回で観測されている.

図11は, Rev 284における観測結果である. 上段の図より, 0816 UTにプラズマポーズ ( $L = 5.6$ ) が認められ, 1050~1120 UTの間においては, プラズマポーズ近傍を出入りしたと考えられる容量の増減がある. このとき $K_p = 2^+ \sim 3$ である. 0800および1130 (0720ころも?) UTにはプラズマポーズの内側であるが, UHRノイズではないかと思われる強い信号が受信されている. 一方, 同じ周回に対して, NPW-VによるVLFエミッションの観測例を図12に示す. 黒くぬりつぶされた領域がエミッションのあったところで, 左軸にその周波数が示されている. 同じスケールでサイクロトロン周波数 $f_H$ も表示されている. 0800 UTすぎに図上部についているPマークは, DPLの上記の容量観測から得られたプラズマポーズの位置を示すものであるが, 波動の観測からみると, この点を境として急にサイクロトロン周波数近傍のエミッションが受信され始めており, まさしくプラズマポーズを横切ってプラズマ圏を出たものと考えられる. この現象は衛星が1120 UTに再びプラズマ圏に入るまで続いている. このように, アンテナ容量測定はプラズマポーズ検出に有効なことがわかる.

## 6. む す び

NWC局の信号の衛星によるドップラーシフトの観測により、ノンダクトおよびダクト伝搬の信号が観測された。さらにモデル電子密度分布を用いることにより、受信された信号の wave normal 角を知ることができるが、さらに本衛星による観測をもとにした分布を利用して、Ray Tracing を行い、より詳しい検討をする必要がある。

アンテナ容量測定は、周囲のプラズマの状態を知ること、特にプラズマポーズの検出に有用であることが示された。また、ホイスラーモード波の他にサイクロトロン周波数より高い周波数の波も度々受信されている。この内あるものはUHRノイズと考えられるが、その他電子プラズマ波などのいわゆる static mode の波の可能性もある。

アンテナ容量の絶対値に関しては、入力端子間の浮遊容量が関係するが、アンテナが十分に伸びきっていない事による容量が若干残っている可能性がある。この値が大きければ、アンテナ容量はそれだけ小さくなるが、その量はあまり明確ではない。

## 謝 辞

EXOS-B衛星は、東京大学宇宙航空研究所のスタッフの方々のご努力のおかげで打ち上げに成功した。特に、大林辰蔵教授、河島信樹助教授、東北大学大家寛教授に謝意を表します。PCMデータ取得のための地上システムは、電気通信大学齊藤梅朗、岩倉博、宮武貞夫の各氏のご尽力のたまもであります。搭載、地上およびQLの各システムの設計・試作やデータ処理については、吉岡浩、松田庄司、高島洋典、芹澤善積、河部本章の各氏に卒業研究としてご協力願った。また、装置は明星電気㈱の製作によるものであり、特に金子博、阿部誠両氏に謝意を表します。

## 参 考 文 献

- [1] K. Hashimoto, I. Kimura and H. Kumagai, *Planet. Space Sci.*, **25**, 871, 1977.
- [2] 木村・橋本：宇宙研報告，**10**，587，1974.
- [3] 木村・橋本・吉岡：科学衛星シンポジウム，73，1975.
- [4] 木村・橋本・松田：宇宙観測シンポジウム，319，1976.
- [5] 橋本・木村・高島：同上，52，1977.
- [6] 橋本・芹澤・木村：同上，277，1978.