

あけぼの (EXOS-D) 搭載 VLF 装置による初期観測結果

山本 正幸¹⁾・木村 磐根¹⁾・長野 勇²⁾
橋本 弘藏³⁾・岡田 敏美⁴⁾・林 幹治⁵⁾
澤田 晃¹⁾・伊藤 嘉彦¹⁾・軒内 栄一²⁾
岸 洋司¹⁾・笠原 禎也¹⁾

Results of preliminary observations by Akebono (EXOS-D) VLF instrument

By

Masayuki YAMAMOTO, Iwane KIMURA, Isamu NAGANO KOZO HASHIMOTO,
Toshimi OKADA, Kanji HAYASHI, Akira SAWADA, Yoshihiko ITO, Eiichi KENNAI,
Yoji KISHI, and Yoshiya KASAHARA

Abstract: The VLF wave instruments on board Akebono (EXOS-D) were designed to investigate the propagation characteristics of ground-based VLF transmitter signals in the magnetosphere, the wave phenomena closely associated with energetic particle precipitation in the auroral zone, and the physics of wave-wave and wave-particle interaction phenomena. In order to investigate these features, it is important to measure the absolute electric and magnetic field intensities of the wave phenomena of interest in addition to the dynamic spectra. It is also essential to be able to determine the normal direction of the wave and the direction of the Poynting vectors for the phenomena.

The VLF instruments cover a frequency range from a few Hz to 17.8 kHz for electric and magnetic field components and are composed of the following subsystems: a wide band analyzer (WBA), multi-channel analyzers (MCA) Poynting flux analyzers (PFX), ELF frequency analyzers,

¹⁾ 京都大学工学部

²⁾ 金沢大学工学部

³⁾ 東京電機大学工学部

⁴⁾ 名古屋大学空電研究所

⁵⁾ 東京大学理学部

and a vector impedance probe (VIP).

The present report describes the characteristics of each subsystem briefly and introduces some preliminary results of the observations, such as an example of the wave normal direction of whistlers determined by PFX, a triggered emission generated from the Australian Omega signal, ion cyclotron emissions observed around the magnetic equatorial plane, and a typical vector impedance of the wire antenna.

1. 緒言

EXOS-D 衛星はオーロラを含むオーロラ粒子加速域の精密観測とそれに関連する磁気圏プラズマの描像を明らかにすることを主目的にした衛星であるが、低周波帯の波動観測を担当する VLF 装置としては、極域のオーロラ粒子と強い関連を持つ波動を詳細に調べることが勿論のこと、VLF 波動の伝搬特性の観測から、磁気圏プラズマ密度の空間分布を明らかにしようとする目的、および磁気圏中で波動-粒子相互作用により発生する波動現象についてのデータを取得し、この分野の理論研究に寄与することなどをも目的としている。これらの目的を達成するために、VLF 波動のダイナミックスペクトルの絶対強度を観測できること、波動の伝搬ベクトル方向についてはポインティングベクトルを決定できること、また今までの観測でまだ十分良く分かっていない ELF 領域の波動を伝搬ベクトルを含めて詳細に観測することを念頭に置いて搭載装置が設計された。

本衛星は 1989 年 2 月 21 日 2330 UT に打ち上げられ、その後アンテナ展開および初期観測をへて順調に本観測が行われてきている。本報告では VLF 装置の詳細は他の報告に譲り、装置のあらましと、データの解析手法を含め初期観測で得られた結果に付いて報告する。

2. VLF 観測装置の概略

波動観測としては高周波帯を担当する PWS 装置があるので、20 kHz を境界として、VLF 装置ではこれ以下の周波数帯域で、MGF が担当する数 Hz 以下を除いた周波数領域を担当することとし、MGF との境界である ELF 帯については磁界センサーとしてのサーチコイルを MGF 側が製作し、電界センサー並びに ELF 回路全体を VLF で受け持つこととなった。

ELF 帯受信機を含む VLF 装置の全構成ブロック図を第 1 図に示す。WBA は 100 Hz から 14 kHz までの広帯域ダイナミックスペクトルを観測する装置で、U-band のアナグテレメータにより地上に伝送されるが、特にそのダイナミックレンジを 75 dB 程度は十分取れるように工夫してある。

PFX は電界 2 成分と、800 Hz 以上はループアンテナにより、それ以下はサーチコイルにより磁界 3 成分を観測し、波動の偏波並びに伝搬ベクトル方向についてはポインティングベクトルを求めるための装置であり、0.1~12.75 kHz の周波数範囲内において、コマンドで選んだ周波数の信号成分を帯域幅 50 Hz で抽出する。コマンドにより、時間と共に周波数をステップ的に変化させ、上記の周波数範囲内で周波数帯域を選んで周波数掃引受信機として

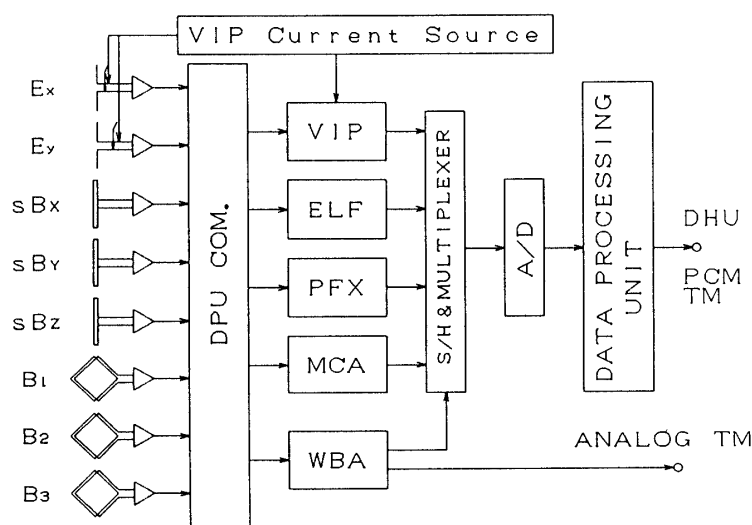


図1 VLF装置各サブシステムのブロック図

動作させることも可能である。信号は320 Hzでサンプリングして中心周波数80 Hzの信号に変換してPCMで伝送される。

MCAは3.16 Hzから17.8 kHzの間を対数的に等間隔に並べた電界16チャンネル、磁界16チャンネルのいわゆるマルチチャンネル解析装置と呼ばれるものであり、中心周波数の両側に中心周波数の30%の帯域幅を持ちそれぞれのチャンネルが約-20 dBの所で重なっている。0.5秒毎にサンプリングを行い、平均値と尖頭値をPCM伝送する。

ELFは電界1成分、磁界3成分を50 Hzの帯域幅で計4チャンネルか、電界1成分、及び磁界1成分計2チャンネルを100 Hzの帯域幅でPCMにより(サンプリング320 Hz)伝送される。

VIPは特に信号電界強度の絶対値を決めるに必要となるダイポールアンテナのインピーダンスをベクトル的に測定するものである。

センサーとしては、全長60 mのダイポールアンテナが衛星のスピニング軸に直交した電界の2成分を測定し、磁気センサーとしては800 Hz以上では、60 cm角10回巻ループアンテナ3個により直交3成分を測定し、800 Hz以下では $3 \times 3 \times 300$ mmのパーマロイコア(積層 $50 \mu\text{m} \times 60$ 枚)の上に 10^5 回巻いたサーチコイル3個により直交3成分を測定する。各々の感度はループアンテナの場合5 kHzで $0.005 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、サーチコイルでは100 Hzで $0.2 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 程度である。(詳細は文献1), 2)参照)

3. 初期観測結果

3.1 WBA (広帯域VLF受信機)

磁気圏で観測されたVLF現象のダイナミックスペクトルは、20 kHzのサブキャリアでVSB変調されたのちU-bandテレメータで地上に送られてくる。地上ではこの信号をワークステーションによりFFT解析し、元のVLFスペクトルの100 Hz~14 kHzの範囲の成分について20 ms毎に320点のディスクリットな周波数のデジタルデータを、20 kHzのサ

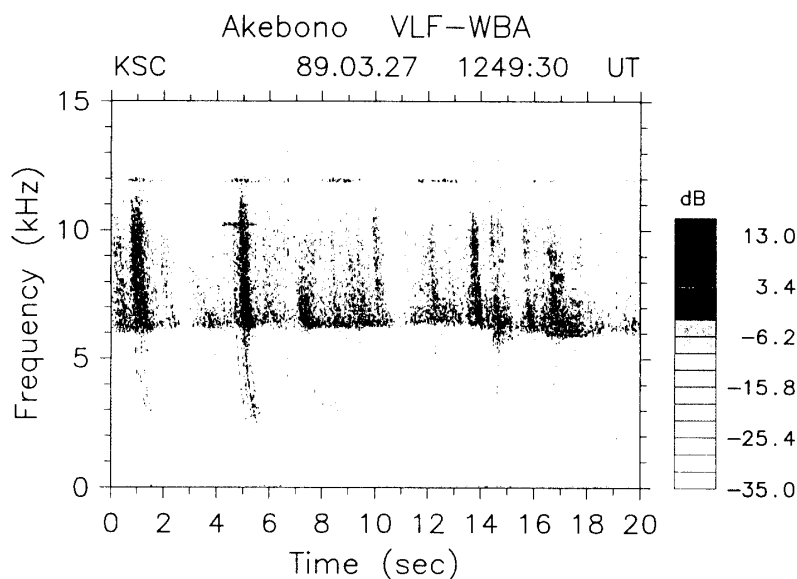


図2 ワイヤアンテナで受信されたワイドバンドスペクトルの例

ブキャリアのレベルを基準値とした相対値として記録する。記録媒体は 8 mm video tape (1 巻 2.3 GB で、約 40 時間分の VLF データに相当) である。ダイナミックスペクトルはパソコンの CRT 上に表示され、また必要に応じレーザプリンタにより A4 一枚の用紙に 500 秒分のスペクトルを 50 秒ずつ 10 本として印刷表示される。また拡大し、詳細なスペクトルも得ることができるようになっている。

図 2 はその拡大スペクトルの一例 (1989 年 3 月 27 日 1249:30 UT) である。4 秒周期 (スピン周期の半分) のスピンモジュレーションを受けているが、ノイズラー、LHR ノイズ、および海上航法用地上 VLF 局信号でオーストラリアから送信されている周波数 10.2 kHz の信号、及びソ連アルファ局信号 (12.0 kHz) が受信されている。衛星の位置は高度 2,800 km、磁気緯度 40.0°N、磁気経度 163.5°W で L 値が 2.7 である。信号強度も絶対強度のわかったサブキャリアとの相対値としてメモリーされているので信号の絶対強度をデジタル的に読み取ることもできる。

この場合センサーとしては全長 60 m のワイヤーによるダイポールアンテナが用いられている。コマンドにより 60 cm 角の 10 回巻ループアンテナも使用できるが、両者ともノイズモードの電磁波動に対してはほぼ同一の感度であり、大変良質のスペクトルが得られている。

オーストラリアから送信されたオメガ信号が、磁気圏内でどのような強度分布をしているかは大変興味のある問題である。あけぼのの WBA 装置でオメガ信号が受信された時間のあけぼのの軌道を図示すると図 3 のようになる。左は磁気子午面に投影した軌道を示し、また右側は磁気緯度経度面に投影したものである。これは南半球の送信源からレイトレイシングにより得られる電波の通路の示す傾向と良く一致している。ただ、対馬から送信されるオメガ信号は大変受信されにくいことがわかっている。

またこれらのスペクトルからは信号の観測された絶対時刻も読み取れるので、送信された

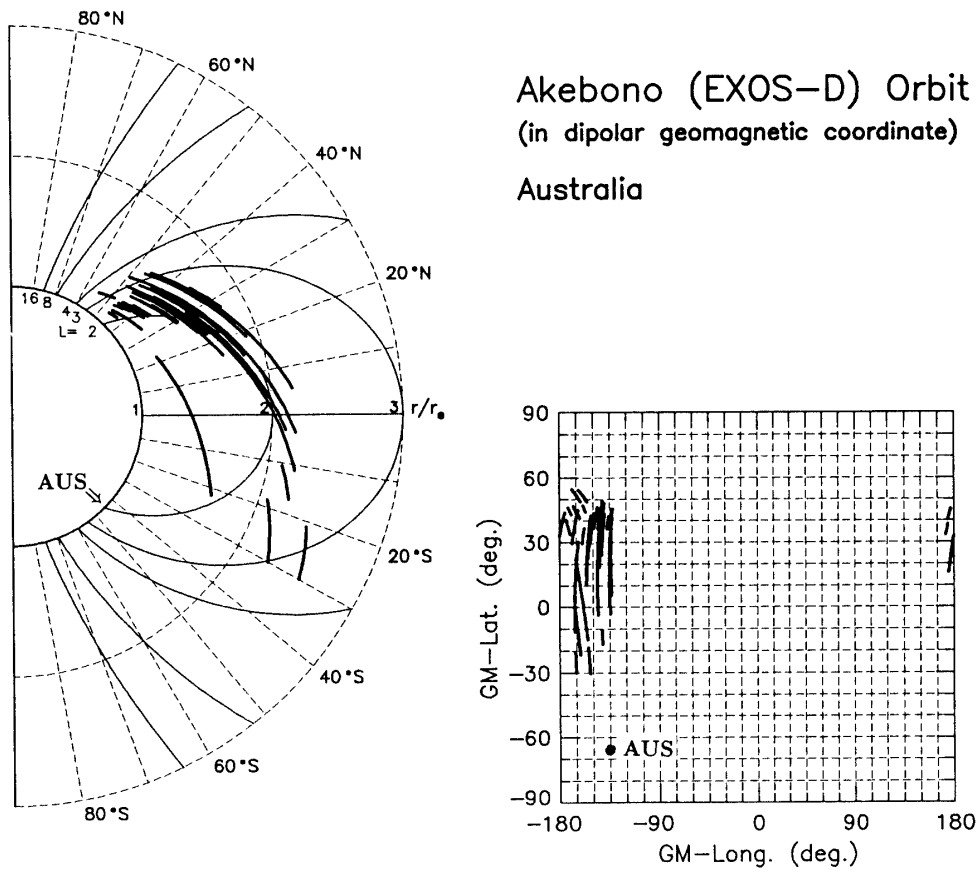


図3 オーストラリア・オメガ信号の受信されている時間の軌道

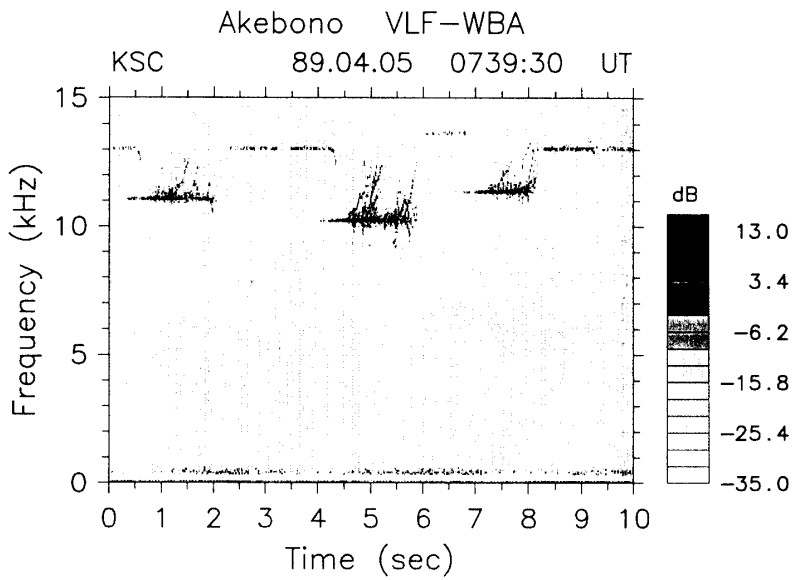


図4 オメガ信号からのトリガードエミッションの例

時刻からの差として地上局からの伝搬時間が測定できる。オーストラリアのオメガ信号をKSCでデータ取得した場合伝搬時間は0.5~0.7s程度で、レイトレイシングによって求められる伝搬時間と良く一致する。

一方図4は同じくオーストラリアからのオメガ信号が受信されているスペクトル(1989年4月5日0739:30 UT)であるが、特にこの場合は周波数10.2, 11.05, および $11\frac{1}{3}$ kHzの信号が荷電粒子(特に電子)との相互作用により強い二次的な電波を放出している例で、トリガードエミッションとも呼ばれている。これらは特に我々の研究対象の一つである。VLFの観測が始まった3月5日以来、太陽活動度が非常に上がったためか、このような現象は、3月10日, 11日, 21日, 27日, 4月5日と1ヶ月の間に計5回も見つかっている。これらは、本年3月の太陽活動の異常増加に伴う磁気嵐のピークの日とは一致しないが、これは、著者ら³⁾のEXOS-Bによるサイプル信号のトリガード放射の観測結果から得られている結論、すなわち磁気活動度ピーク直後の比較的静かな時期に発生しやすい傾向と一致している。

3. 2 MCA (マルチチャネルアナライザ)

MCAでは電界、および磁界それぞれ16チャンネルで、尖頭値は1秒毎、平均値は0.5秒毎にPCMテレメータで送られてくる。従ってMCAのデータはVLF波の全体像を知るのに便利である。図5はそのデータの一部であるが、16点の周波数に対応して平均値の各4秒間の最大値について強度の等高線を引く形で強度マッピングが行われている。図中破線、一点鎖線、二点鎖線はそれぞれ軌道上のプロトン、ヘリウム及び酸素のサイクロトロン周波

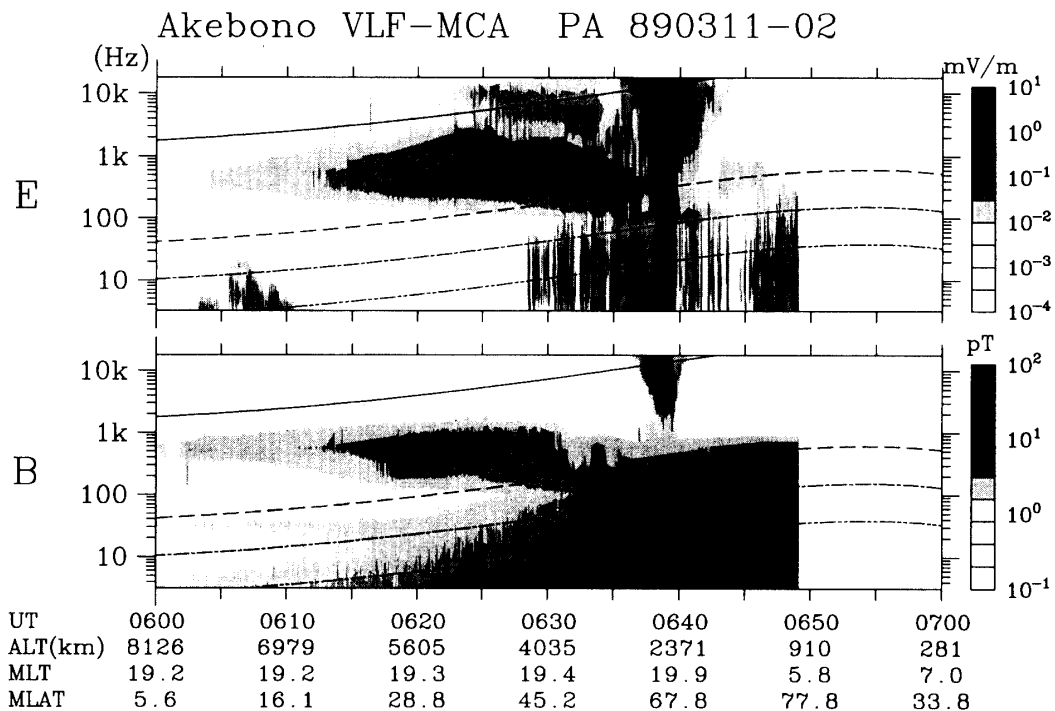


図5 MCAによる電界、磁界成分のスペクトルの例

数であり、実線は電子のプラズマ周波数がサイクロトロン周波数より十分大きいという近似をした場合のLHR周波数を描いたものである。この例は1989年3月11日にPrince Albertでとられたもので、0639 UTにはオーロラ領域特有のfunnelタイプのオーロラヒスエミッションが観測されている。また極域のプロトン、ヘリウム酸素のサイクロトロン周波数以下のエミッションはこの領域でしばしば観測されるが、電界と磁界で性質が全く異なっている。

3.3 PFX (波動伝搬ベクトル観測装置)

電界2成分と磁界3成分を測定するPFX装置より波動伝搬ベクトルが求められ、ローカルの電子密度分布が得られれば、電磁界5成分より電界の残り1成分も求めることができるので、ポインティングベクトルも計算できる。

伝搬ベクトル方向を求める方法としては電磁波の伝搬ベクトルが磁界成分の偏波面に垂直であることを利用している。PFXの周波数はコマンドにより固定にもできるし100 Hzから

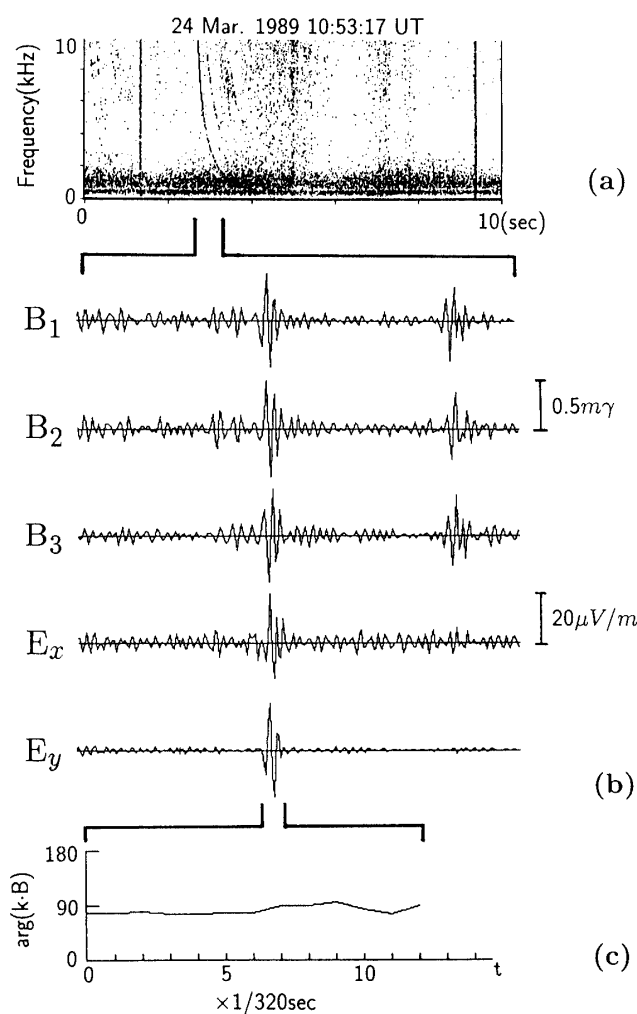


図6 PFXによるホイスラーの出力波形と伝搬ベクトル方向

12.75 kHz の間であれば 50 Hz の整数倍の間隔でステップ状に掃引することもできる。

図 6 a) は伝搬ベクトル方向を求めたいホイッスラーのスペクトルを示し, b) には PFX 周波数を 6 kHz に固定したときの電界 2 成分, 磁界 3 成分 (帯域幅 50 Hz) の対応する波形を示している. また c) は上記の原理にしたがって求められた伝搬ベクトル方向の地球磁場とのなす角度を示す. 衛星のスピン軸の絶対方向を知ることにより伝搬ベクトルの絶対方向も求められる。

3. 4 ELF (ELF 帯の波動観測)

これまでこの帯域で見つかった大変興味ある現象の一つとして, 磁気赤道の近傍だけで観測される ELF エミッションがある。

図 7 は 1989 年 5 月 27 日にあけぼのが南半球から磁気赤道面に接近していく場合の例であるが Ex, sBx, sBy, sBz に対応する 4 つの f-t スペクトルが示されている. 特に sBy, sBz

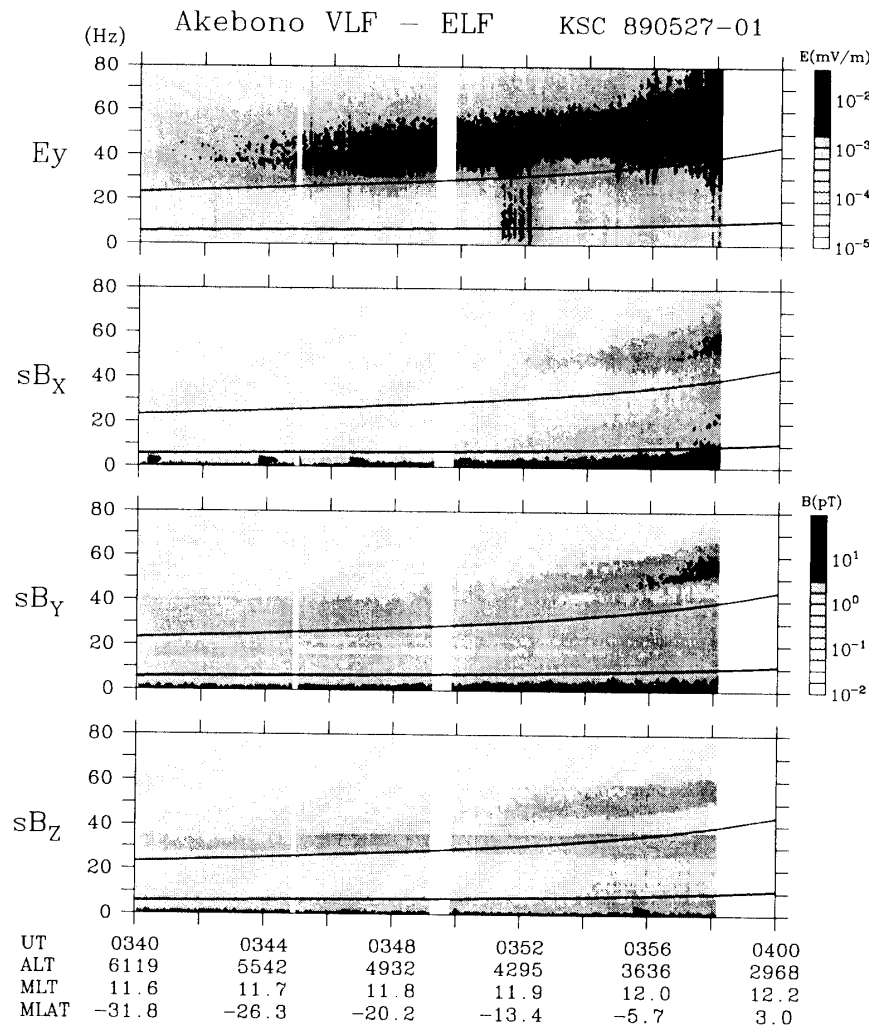


図 7 磁気赤道領域で観測される ELF エミッションの例 (その1)

のスペクトル上に見られる 32, 64 Hz の信号は BDR (バブルメモリ) によって起きた干渉である。左端約 22 Hz から右端約 43 Hz まで連続的に変化する線は衛星位置のヘリウムのサイクロトロン周波数であり, 左端 7 Hz から右端 11 Hz までの線は酸素イオンのサイクロトロン周波数を示す。これから明らかにヘリウムのサイクロトロン周波数の少し上, プロトンのサイクロトロン周波数よりはるか下に電界磁界成分共にみられる強いエミッションが見られる。この波はプロトン, ヘリウムイオンの共存により存在できるイオンサイクロトロンモードであり, 磁気赤道の両側のある緯度で LHR 反射したものと考えられる。

同様にして更に酸素イオンも共存すると, 酸素イオンのサイクロトロン周波数の上側にもヘリウムイオンのサイクロトロン周波数の上側と同時にエミッションがある例が多数見つけられており図 8 はその例であり, 特に電界成分に強い 2 層構造のエミッションが見られる。これらは図 7 のものと同じメカニズムでできたものと考えられる。なおこのモードの発生機構には高い温度のイオンの存在が必要であるが, 残念ながら同時の粒子観測は殆ど行われていない。

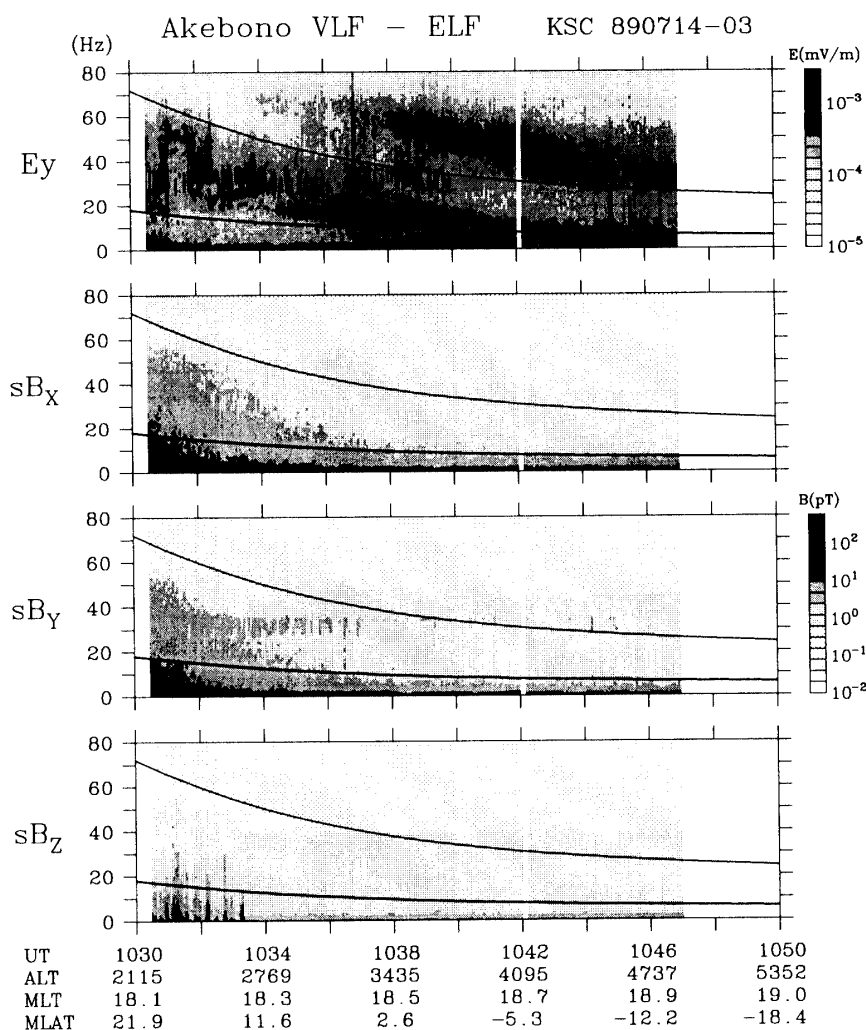


図 8 磁気赤道領域で観測される ELF エミッションの例 (その 2)

3. 5 VIP (ベクトルインピーダンス測定)

プラズマ中の電磁界強度の絶対測定には特にワイヤーアンテナのインピーダンスを知ることが必要であり、あけぼの衛星ではアンテナに定電流源からRFの電流を注入し、プリアンプ出力の振幅、位相からアンテナインピーダンスを求めようとしている。そのブロック図を図9に示す。RsおよびCsが測定から求められるアンテナの等価インピーダンスである。VIPデータの解析によれば、高度4,000 km以上では典型的値はCs=250 pF, Rs=500 kΩであることがわかった。また $f_0 = 1 / (2\pi C_s R_s) = 1,300$ Hz以下の周波数では抵抗性に、 f_0 以上の周波数では容量性となる。

4. 結論

本報告に述べたようにあけぼのに搭載されたVLFの各装置は大変良好なデータを送ってきており、今後のデータ解析により、多数の新しい知見が得られることは確実であり、VLFチームとしても大変喜ばしいことである。ただ多くのデータは物理量に変換するに十分注意して行う必要のあるものが多く、今後の解析には時間を掛けて十分慎重に行う予定である。今回の報告では、比較的定性的な結果の報告にとどめているところも多いのはそのためである。

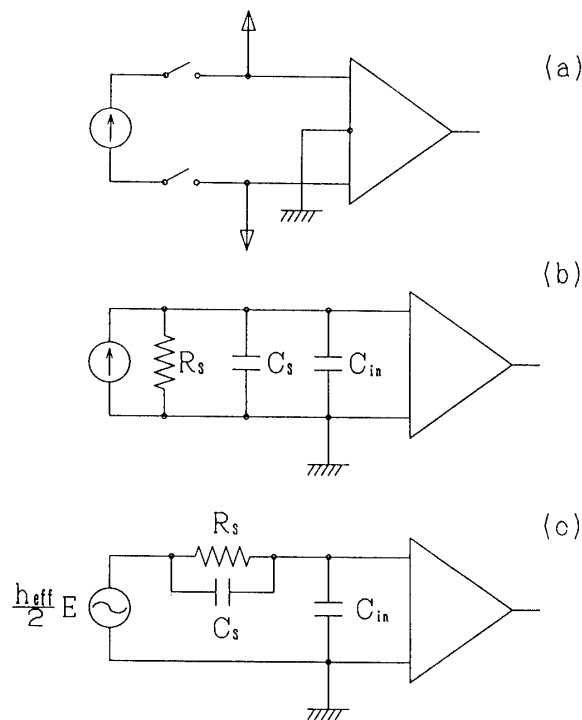


図9 VIPによるアンテナインピーダンス測定の等価回路図

5. 謝 辞

本実験はあけぼのプロジェクトマネージャである鶴田教授を始めとして、プロジェクトサイエンティストの大家、西田両教授、プロジェクトエンジニアの名取、中谷、小野田各助教授、および大島観測係長、並びに飛翔班の方々に負うところが大きい。また衛星追跡については鹿児島を始めとして、昭和基地、プリンスアルバート、エスレンジにおいて行われている。またこれらの運用については、小原隆博氏に負うところが大きい。これらの方々にまず感謝の意を表す。

次に衛星システムの完成には NEC のスタッフのご努力に負うところが大きく、また VLF 装置は明星電気の方々の献身的な働きで完成された。サーチコイル用のマストは日本飛行機によって良質のものが作られた。また VLF 装置は他の機器から受ける干渉を特に小さくする努力をしなければならなかったが、搭載各機器の担当者は大変協力的に干渉雑音を減ずる努力をして頂いた。これらすべてが VLF 装置から良質のデータを得ることに貢献しており、あけぼの搭載機器各班担当者全員に厚く感謝する次第である。

なお VLF データの解析には PWS から得られる電子密度データおよび、姿勢決定のために MGF のデータは不可欠であり、これらのデータの提供に対して謝意を表す。

最後に、このプロジェクトは、Co-I として国立極地研究所江尻全機教授、電気通信大学芳野赴夫教授、京都大学超高層電波研究センター松本紘教授などの協力をも得ていることを付記して謝意を表す。

参 考 文 献

- [1] EXOS-D 中間報告書 昭和63年2月 宇宙研
- [2] 昭和63年度第2次飛翔実験科学衛星 EXOS-D (M-3SII-4) 計画書 平成2月 宇宙研
- [3] Kimura 他, J. Geophys. Res. 88 (A1), 282-294, 1983.