

科学衛星 JIKIKEN (EXOS-B) による VLF エミッションと電子フラックスの観測とその比較*

松本 紘** ・ 守倉 正博** ・ 橋本 弘蔵**
木村 磐根** ・ 向井 利典

Observation and Comparative Study of
VLF Emissions and High Energy Electron
Flux by EXOS-B Satellite

By

Hiroshi MATSUMOTO, Masahiro MORIKURA, Kozo HASHIMOTO,
Iwane KIMURA and Toshifumi MUKAI

Abstract: Simultaneous observations of VLF plasma waves and energetic electrons have been made by EXOS-B (JIKIKEN). In this paper, a case correlation study is given for data on Revs. 185, 273, 284 and 588. Since only Rev. 284 is available for a continuous simultaneous observation more than five hours, a main emphasis is laid on the data for Rev. 284. It is found that VLF plasma waves near the local cyclotron frequency is well correlated with several-KeV electrons.

要 旨

科学衛星 EXOS-B に搭載された VLF 受信機と電子エネルギー分析器とを用いて、VLF 帯プラズマ波と高エネルギー電子の同時観測が行われた。本論文では Rev. 185, 273, 284, 588 の四つの軌道上で行われた同時観測結果に基づき、VLF 波と高エネルギー電子フラックスの相関を検討している。詳細な相関を見るのに十分な長時間連続データは Rev. 284 のみであるため、Rev. 284 が中心に議論されている。局所的なサイクロトロン周波数近傍の VLF プラズマ波と数 KeV のエネルギーを有する電子フラックスの間には良い相関が認められた。

1. 序 論

科学衛星 EXOS-B は、国際磁気圏観測 (IMS: International Magnetosphere Study) 期

* 宇宙研特別事業費による研究論文

** 京都大学工学部

間中にその計画の一部として打ち上げられた衛星の一つである。EXOS-Bは1978年9月16日14時00分に鹿児島宇宙空間観測所(KSC)より打ち上げられ「じきけん」と命名された。EXOS-Bは、磁気圏プラズマ内の波動-粒子相互作用の研究を主目的の一つとしており、初期軌道として apogee 30055 km, perigee 227 km, 周期 523.6 分, 傾斜角 31.1° を持つよう打ち上げられた。

EXOS-Bには波動-粒子相互作用研究のため、自然界に存在するプラズマ粒子を計測する受動モードと衛星から積極的に波動や粒子を送出し、自然界を人工的に乱すことにより相互作用を見ようとする能動モードの二つが用意されている。本稿では、前者の受動モードに設定された VLF 帯プラズマ波観測と高エネルギー電子フラックス観測の比較を中心に報告する。VLF 帯プラズマ波と高エネルギー電子フラックスの同時観測は Rev. 185以降にしか行われず、その後もその頻度は決して多くはない。本報告では、Rev. 185, 273, 284, 588 の四つのパス上で観測された VLF プラズマ波のスペクトルとその時に観測された電子のエネルギー・スペクトルについて議論する。

第2節で簡単に VLF 受信機と電子エネルギー分析器との説明を行い、第3節で観測結果とその検討を述べる。第4節では若干の考察と今後の問題点が述べられている。

2. VLF プラズマ波受信機と電子エネルギー分析器

EXOS-Bに搭載された VLF プラズマ波観測装置のブロック図を図1に示す。受信機はコマンドにより、二組のダイポール・アンテナ及びループ・アンテナの三種のアンテナのいずれかと接続される。長い方のダイポール・アンテナは片側 51.5 m, 短い方のダイポール・アンテナは片側 35 m の長さを持ち、平均直径が約 0.7 cm である。ダイポール・アンテナは、いずれも先端 12 m が金メッキされ、残りはカプトン材で非導電性コーティングが施されている。ループ・アンテナは、衛星の下方に伸ばされたブームの途中に設置されており、直径 15.5 cm の 76 回巻きの空心ループである。これらのセンサーの配置関係を図2に示す。これまでの観測は主として長い方のダイポール・アンテナで行われている。

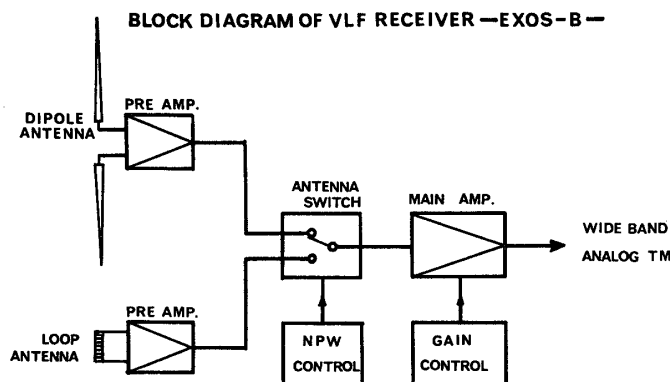


図1 EXOS-Bに搭載された VLF プラズマ波受信装置のブロック・ダイアグラム

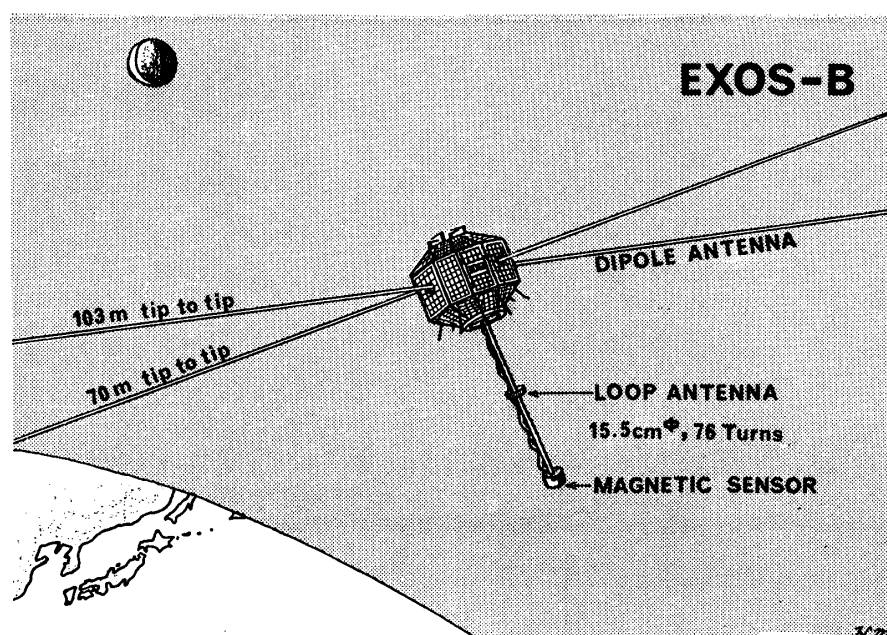


図2. EXOS-Bの外観とVLFプラズマ波センサーの配置図

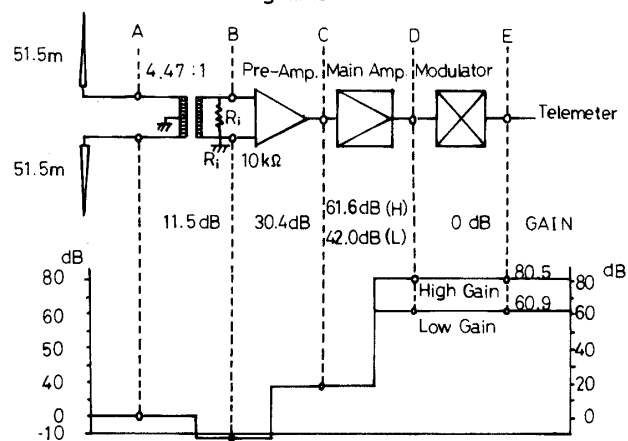
図3.に、ダイポール系VLF受信機のレベル・ダイヤグラムとゲイン特性、図4.にその周波数特性を示す。この系の前置増幅器の入力における入力感度の下限は $5\mu\text{V}$ である。

受信機の出力は400 MHzのPM変調波としてアナログ伝送されている。この場合、受信バンドの150 Hz ~ 9.5 KHzの信号は10.24 KHzのサブ・キャリアにより10.09 KHz ~ 740 Hzに周波数変換され地上に送信されている。地上ではこれを復調し、データ・レコーダーに録音されている。

電子エネルギー分析器は半球型静電エネルギー分析器、掃引高圧電源、チャンネルトロン及び前置増幅器とより構成されている。分析エネルギー範囲は3 eVから10 KeV、ダイナミック・レンジは100 eVにおいて $10^4 - 10^9$ 個/cm². sec. ster. eVである。このエネルギー範囲を13のチャンネルに分割し、各チャンネル毎にフラックスを測定している。一チャンネルの測定は62.5 msecを要する。従って、エネルギー・スペクトルの測定には1秒を要するように設計されている。

EXOS-B VLF RECEIVER

1. Block and Level Diagrams



2. Level Characteristics

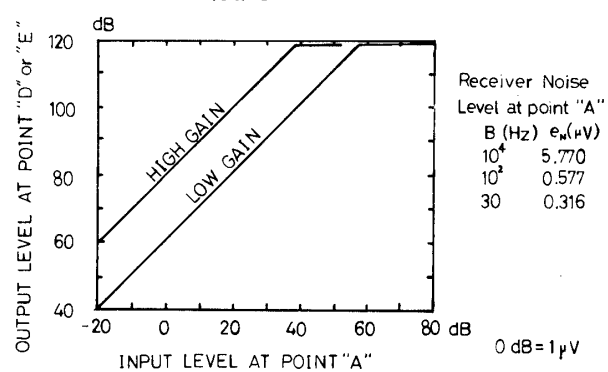


図3. ダイポール系 VLF 受信機のレベル・ダイアグラムとゲイン特性

3. Frequency Characteristics

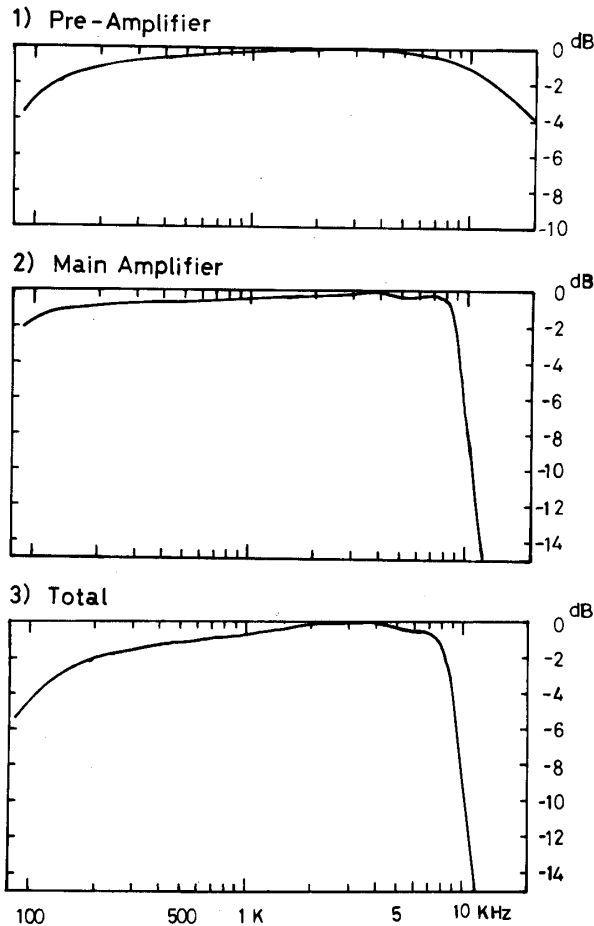


図4. ダイポール系 VLF 受信機の周波数特性

3. 観測結果

本節では Rev. 185, 273, 284 及び 588 における VLF 波スペクトルと電子エネルギー・スペクトルの観測結果を示す。Rev. 185 上においては、電子フラックスの測定は極く短時間しか行われなかったため、VLF 波スペクトルのみを示すこととする。

図 5, 6, 7, 8 に Rev. 185, 273, 284, 588 における VLF 波スペクトルと、電子フラックス等高線表示と、適当に選ばれた時間（エネルギー・スペクトルの縦軸に相当する時間）における電子エネルギー・スペクトルを示す。VLF 波スペクトルはそれぞれの図の最上段の図中、黒くぬりつぶされた領域で示されている。図 8 最上図の灰色部は弱い波動の存在を示している。又、最上図には、それぞれの Rev. における衛星位置におけるサイクロトロン周波数が実線で、地磁気緯度が一点鎖線で、L 値が破線で示されている。又、図 6, 7 の最上図の枠外上部に ▼ 印で示されているのは、EXOS-B に搭載された VLF ドップラー観測器

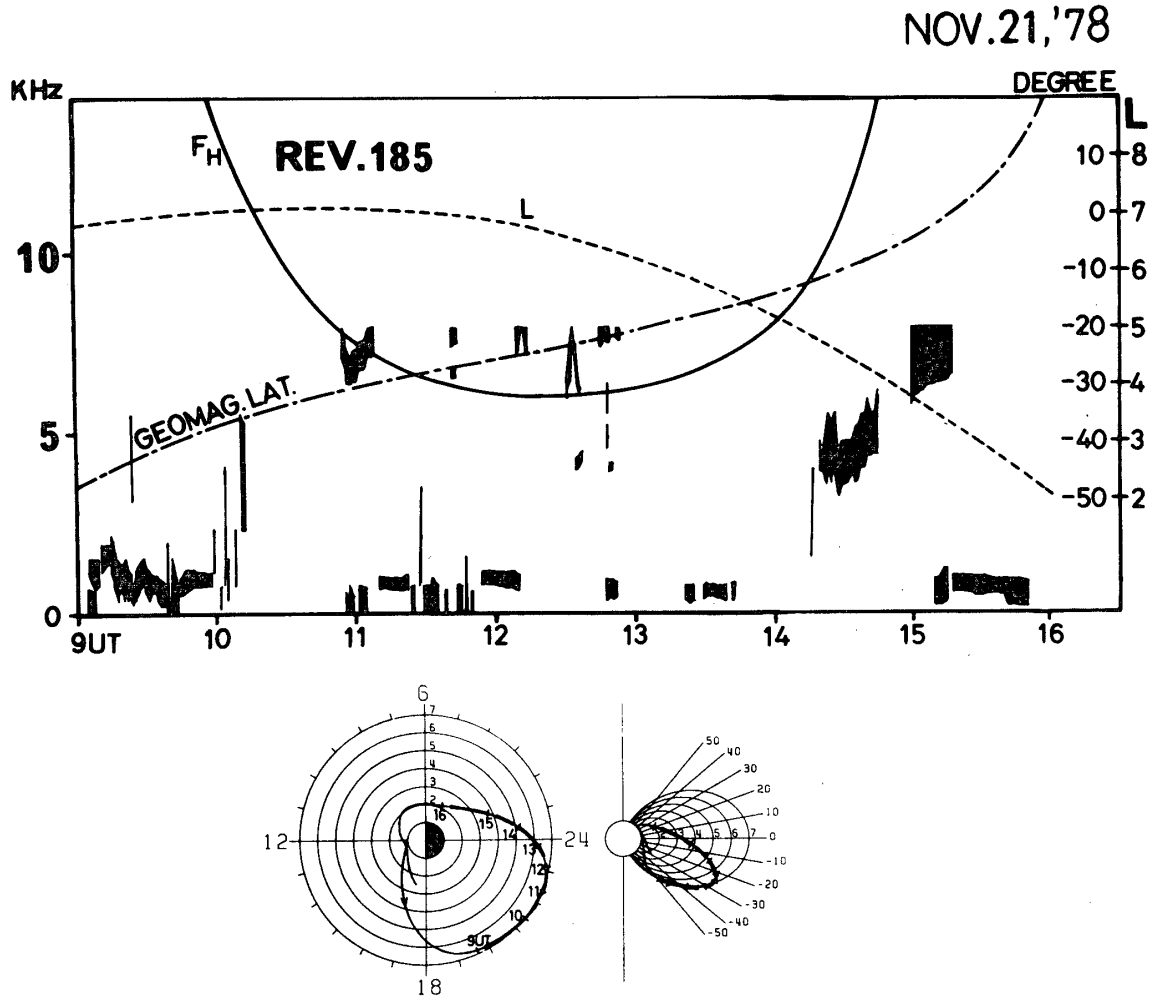


図5. Rev. 185 における VLF 波スペクトル (黒ぬりの部分), 衛星軌道上のサイクロトロン周波数 f_H (実線), 地磁気緯度 (一点鎖線), L 値 (破線) 及び衛星軌道の赤道面, 子午面への投影図

DEC. 22, '78

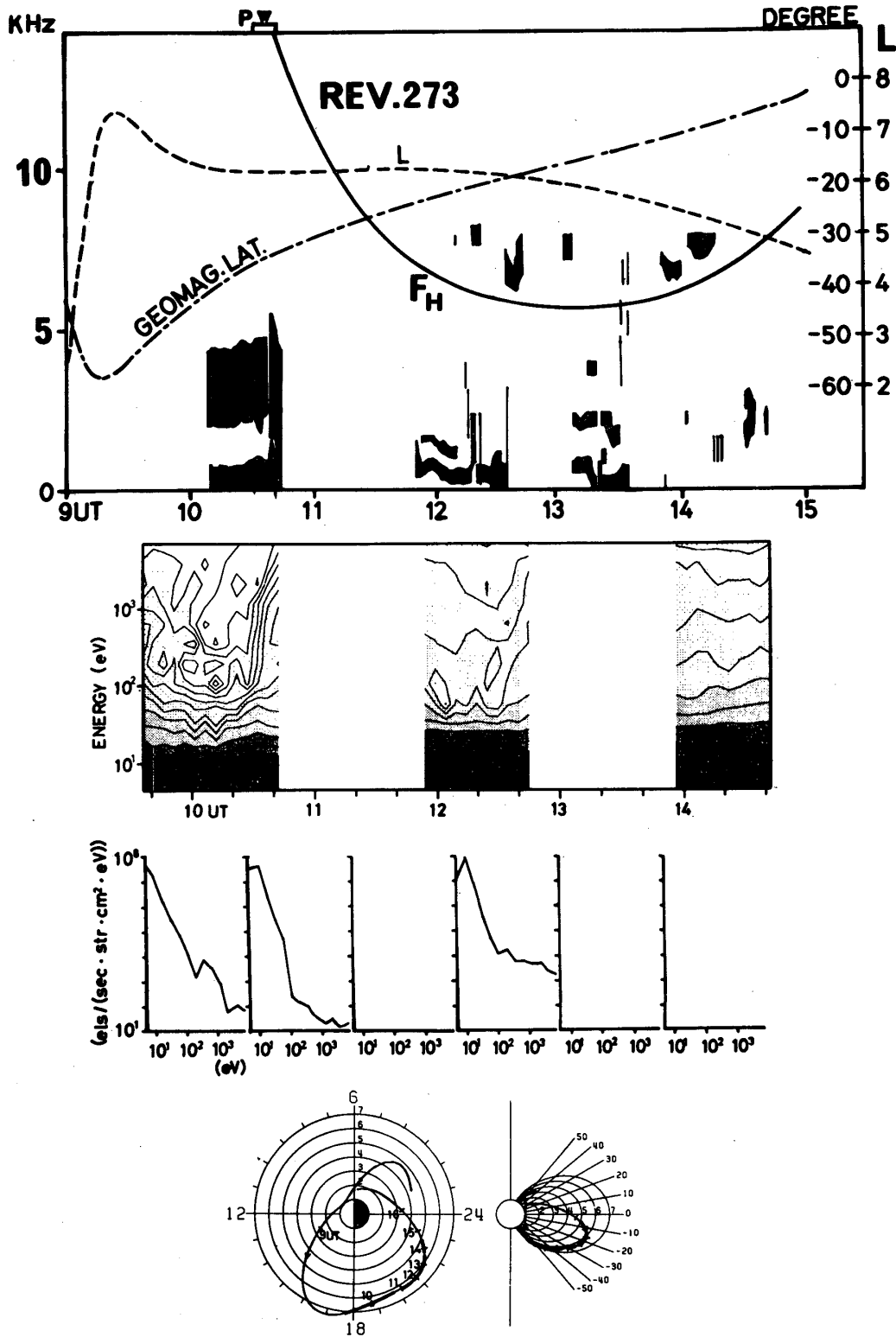


図6. Rev. 273の同時観測結果. VLF波スペクトル, f_H , 地磁気緯度, L値(以上が最上段図)と電子フラックスの等高線表示(第二段目の図)と電子エネルギー・スペクトル(第三段目の図)と衛星軌道.

DEC. 26, '78

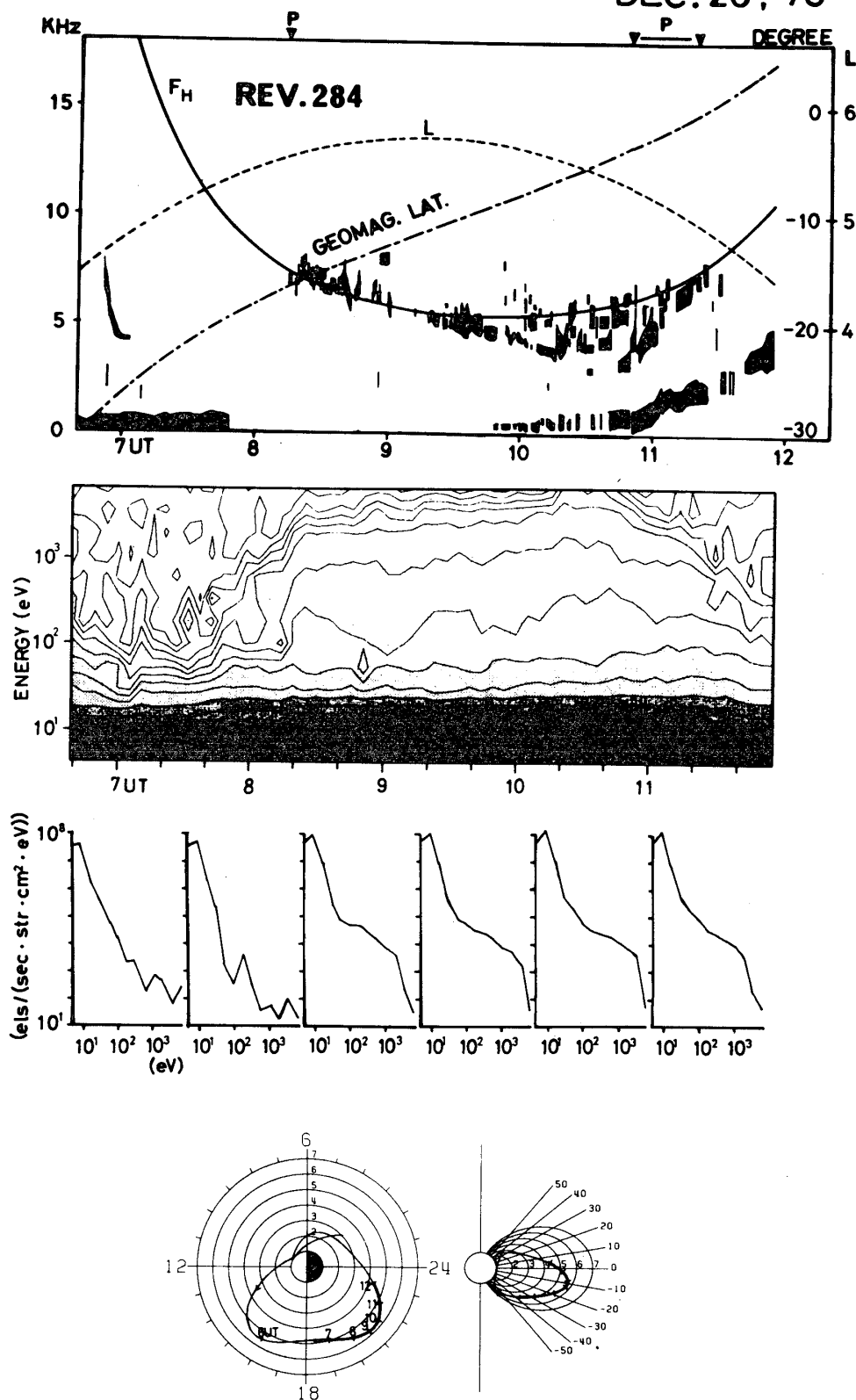


図7. Rev. 284の同時観測結果. 図の構成は図6.に同じ.

APR. 11, '79

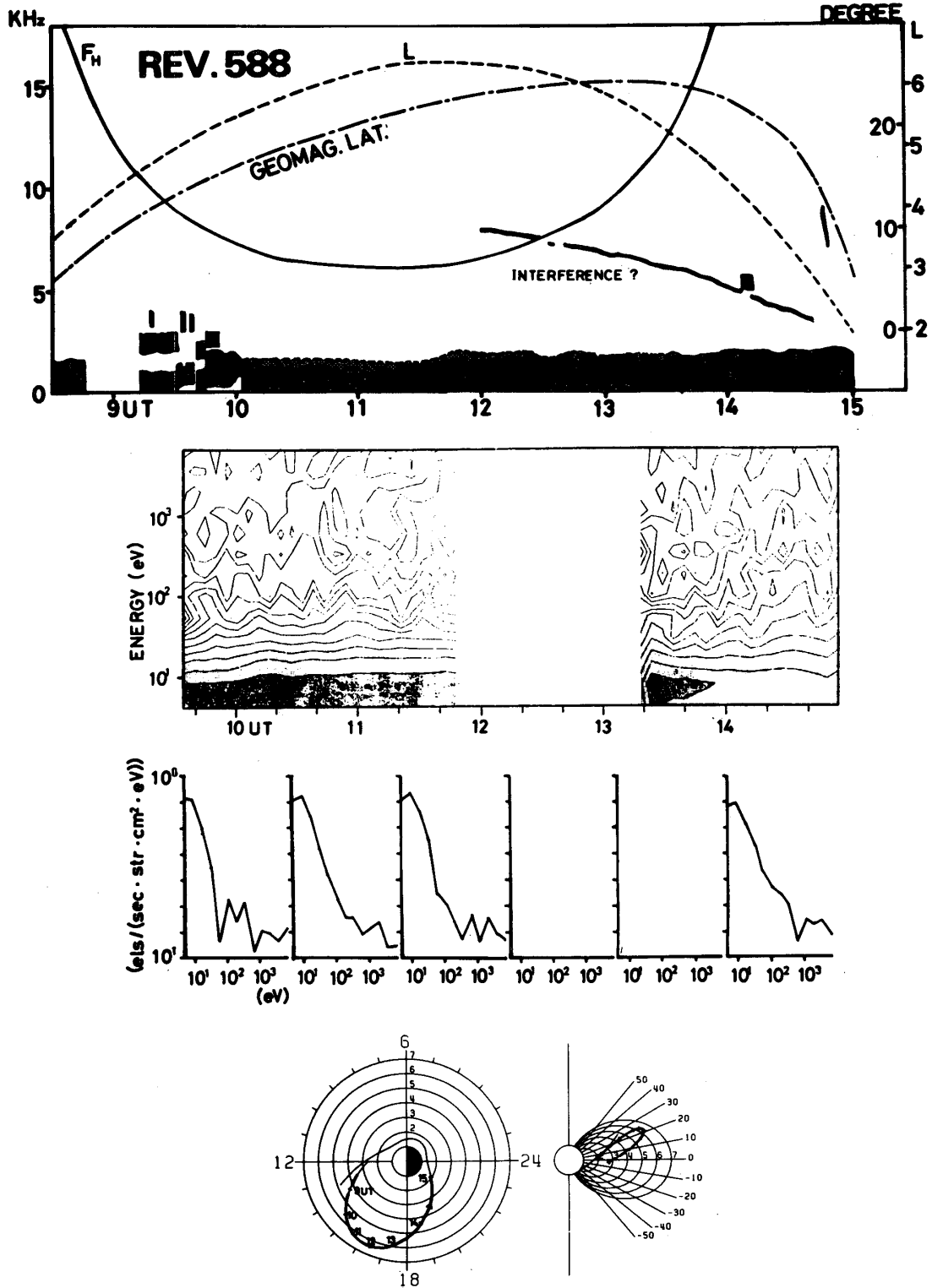


図8. Rev. 588 の同時観測結果。図の構成は図6.と同じ。

(DPL)により決定された* プラズマ・ポーズの位置である。図6においては▼印以前がプラズマ・ポーズ内、以後がプラズマ・ポーズ外に衛星が存在したことを示し、図7においては二つの▼印の間に衛星がプラズマ・ポーズ外に存在した時間を示している。図6～8の第二段目の等高線表示は色の濃い部分が高いフラックスを示している。図5～8の最下部には、衛星軌道が赤道面及び子午面に投影されている。軌道上の太い部分は、その時に VLF 受信機が動作していたことを示す。

Rev. 185 の VLF スペクトルの空間変化パターンは Rev. 273, 284 のそれと類似している。Rev. 273, 284 の VLF スペクトルは、プラズマポーズの内側、即ちプラズマ圏内に局所サイクロトロン周波数 f_H より低い VLF 波が卓越し、プラズマ・ポーズの外側、即ちプラズマ圏外では f_H 付近の波動と 1 KHz 以下の波動とが卓越している。Rev. 185 も同様の変化をしており、この特性の変化から逆に、衛星はプラズマ・ポーズを Rev. 185 においては 10 h 10m UT 付近と 14 h UT 付近に横切ったと推定することが出来る.**

REV. 284 DEC. 26, '78

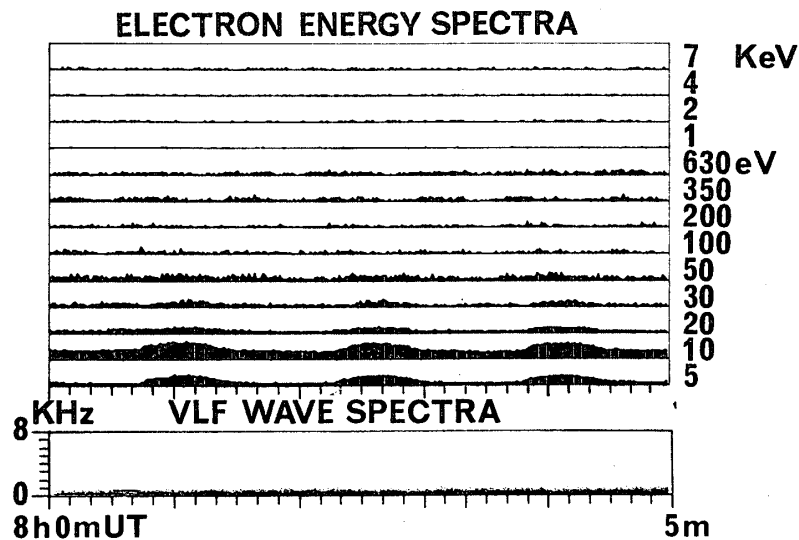


図9. Rev. 284 における各エネルギー・チャンネルの電子フラックス変化と対応する VLF 波動のダイナミック・スペクトル (その1)

* DPL 装置においては、アンテナ容量の連続モニターを行っており、プラズマ・ポーズの内側と外側の急激な密度変動によるアンテナ容量の急激な変化が検知される。

** DPL によるプラズマ・ポーズの推定もこの時間に一致している。

REV.284 DEC.26,'78

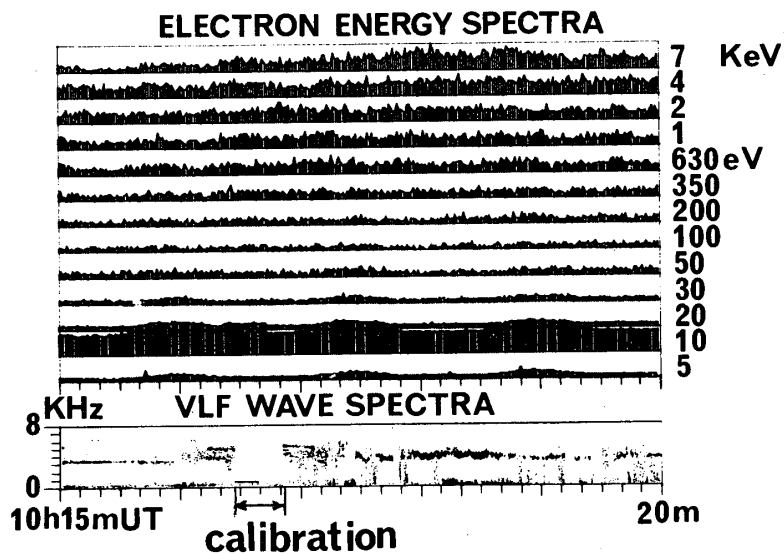


図10. Rev. 284における各エネルギー・チャンネルの電子フラックス変化に対応するVLF波動のダイナミック・スペクトル(その2)

REV.284 DEC.26,'78

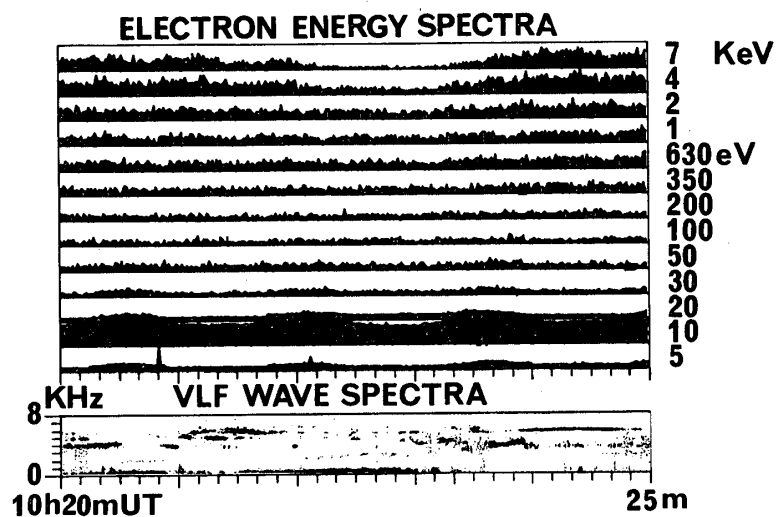


図11. Rev. 284における各エネルギー・チャンネルの電子フラックス変化に対応するVLF波動のダイナミック・スペクトル(その3)

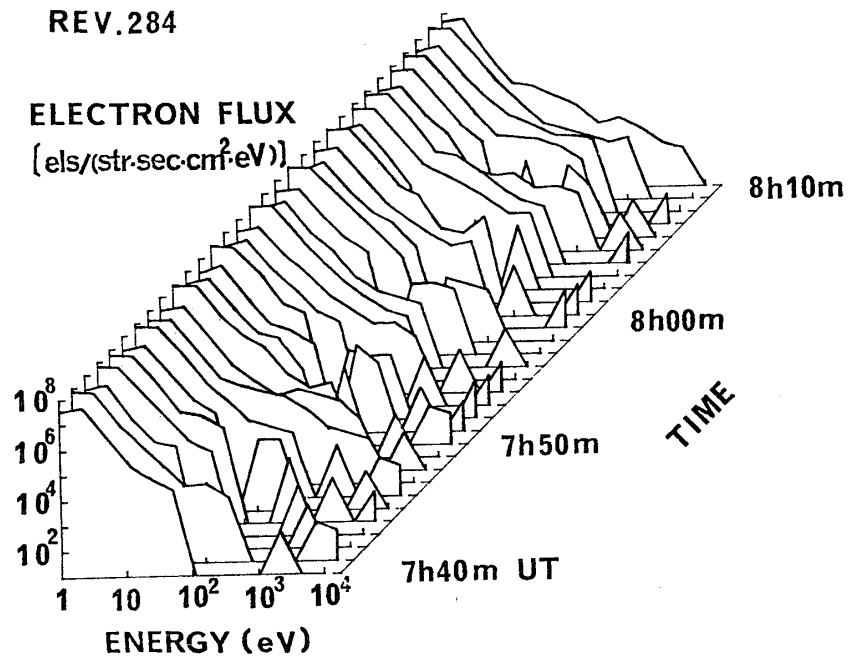


図12. Rev. 284のVLF波活動静穏時の電子エネルギーのスペクトル変化

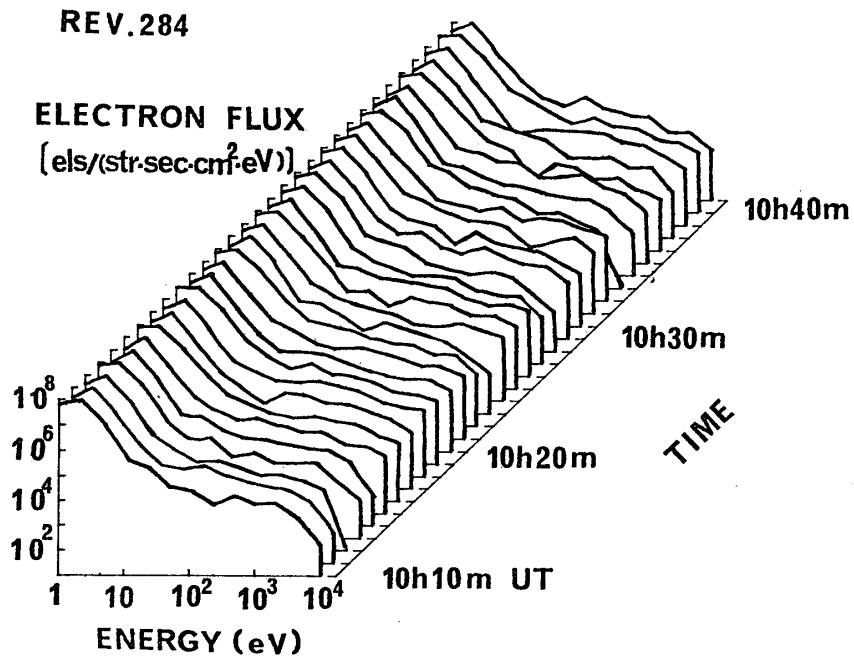


図13. Rev. 284 VLF波活動高揚時の電子エネルギーのスペクトル変化

Rev. 273, Rev. 284, Rev. 588のVLFデータと電子フラックス等高線及びエネルギー・スペクトルとを比較すれば、電子エネルギー分布に100eV以上の高エネルギー部分が現われる時に、 f_H 近傍の周波数帯にVLF波が現われることが見られよう。Rev. 588時には100eV以上の電子フラックスは殆んど小さく、この時にはVLF波の活動は殆んど観測されていない。Rev. 284においては、プラズマ圏外からプラズマ圏内に衛星が再入した時にも電子エネルギー分布はあまり変化がなく、依然として100eV-10 KeV領域に高いフラックスを示している。これに応じてVLF波活動を引続いて高いことが図7に見られる。

最も長時間にわたり連続的にVLF波と電子フラックスの同時観測が行われたRev. 284のデータをもう少し詳細に検討してみる。図9、図10、図11にRev. 284の観測時間のうち、VLF波活動が非常に低い時間(8h 00m UT~8h 05m UT)と非常に高い時間(10h 15m UT~10h 20m UTと10h 20m UT~10h 25m UT)の二例について、VLF波のダイナミック・スペクトルと電子エネルギー・アナライザーの13個のチャンネルのフラックス出力の時間変動を示す。電子エネルギー・アナライザーの各チャンネルの平均エネルギーは同図の各チャンネル出力の右側に記入されている。図12に図9に対応する時間帯(7

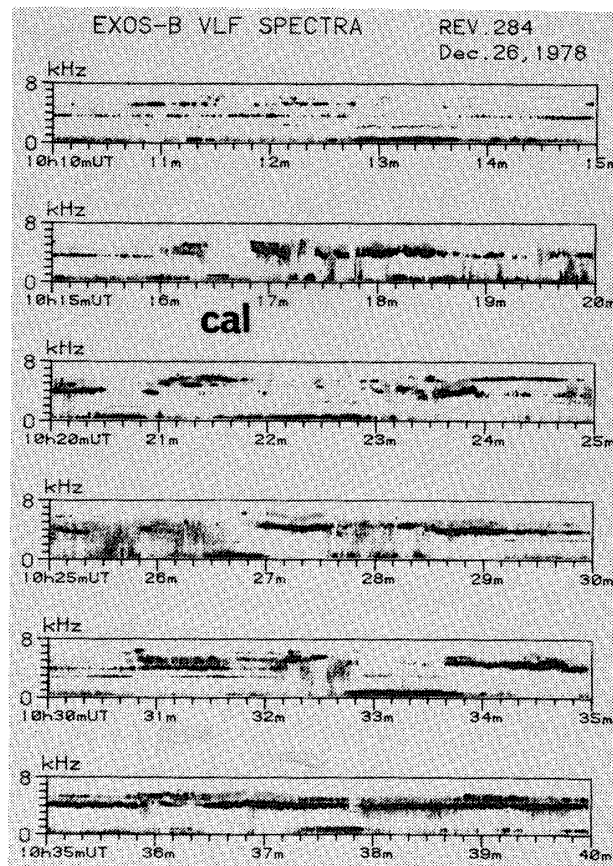


図14. Rev. 284時の代表的VLF波のダイナミック・スペクトル

h 40m UT ~ 8h 10m UT)の電子エネルギー・スペクトルの1分毎の出力をパノラミックに示す。同様に図13は図10, 図11に対応する時間帯(10h 10m UT ~ 10h 40m UT)のそれを示す。また、参考の為に10h 10m UT ~ 10h 40m UT間のVLF波のダイナミック・スペクトルを図14に示す。図9~図13に見られるように630eV~7KeVの平均エネルギー範囲の電子フラックスと4~7KHzに現われるVLF帯のヒス状又はディスクリートのエミッションとは明らかに相関がある。特に図11で明らかのように、4~7KeVの平均エネルギーを有する電子フラックスの増減と4~7KHzに現われるディスクリート・エミッションの強弱とは良い時間対応を示している。図12, 13に示された電子のエネルギー・スペクトルもVLF活動の有無でその形が大きく異なることを示している。

4. 考 察

本稿では、現在まで行われたVLF波と電子フラックスの同時測定の観測結果を示した。例は決して多くなく、三つのRev.上で同時観測が比較的長時間にわたり行われただけである。これらの波動データと粒子データの比較により、500eV以上、特に4KeV以上の高エネルギー電子が多く観測される時にVLF波の活動が高いことが示された。これらの波動は、静電的UHRエミッションやホイッスラー・モード波と考えられる。衛星近傍に存在する電子フラックスと相関が良いのは、これらのVLF波が衛星近傍で発生されていることを示唆している。特に、図11に示されるような衛星近傍の電子フラックスの増減と一対一の対応のつくような波動は、衛星の近傍で発生されたと考える方が自然である。しかし、図10, 11に示されたような一対一の時間対応がつかうような例はむしろ少ない。電子のエネルギー・スペクトルが高エネルギー領域に大きい値を持つようなプラズマ分布が続く時に、一般にVLF波の活動が大きいという一般的傾向が巨視的に明らかであるだけで、一対一の対応が微視的に見られることは稀である。これは、波動の励起源は一般に衛星場所から離れていることに依るからと考えられよう。

更に詳細な定量的相関係数を求めるには、VLF波に関するアナログ・データをデジタル化し、電子フラックスのデジタル・データと共に計算機処理されねばならない。これについては現在検討中である。

謝 辞

EXOS-Bプロジェクトの完遂に多大の努力を惜しまれなかった東京大学宇宙航空研究所のスタッフに感謝します。特に大林辰蔵教授、秋葉鏝二郎教授、東北大学大家寛教授、河島信樹助教授に謝意を表します。また、データ処理関係のソフト・ウェア面では電気通信大学の宮武貞夫氏、岩倉博助教授、斎藤梅朗氏に多大の貢献を頂いた。感謝します。

1979年10月1日