

EXOS-B/Siple 波動-粒子相互作用実験における Siple 局信号の絶対強度の解析*

佐々木主税**・木村 馨根***・橋本 弘蔵***

(1982年10月20日受理)

Absolute Intensity of Siple Signals Observed By EXOS-B/Siple Wave-Particle Interaction Experiments

By

C. SASAKI, I. KIMURA, and K. HASHIMOTO

Abstract : Absolute intensity of Siple signals observed by the EXOS-B/Siple experiments has been studied. The observations were made using a dipole antenna, and the electric field intensities were measured. By using the ambient electron density deduced from the observed propagation times of the signals, the electric field intensity can be translated to the magnetic field intensity.

When the signal intensity was high enough, it was sometimes above the saturation level of the satellite borne VLF receiver. Even if this saturation effect is taken into account, the observed signal levels did not greatly exceed 0.1pT.

The absorption or attenuation suffered by Siple signals during propagation in the earth/ionosphere wave guide mode, and through ionospheric and magnetospheric propagation is theoretically estimated. The estimated signal levels allowing for the above attenuation are not too much different from the observed levels. This fact implies that the observed signal intensities were of reasonable value although the estimate of propagation loss is not always certain.

概 要

1979年夏期にスタンフォード大学と共同で行われた EXOS-B/Siple 実験のサイプル信号の絶対強度について述べている。

-
- * 宇宙研的別事業費による研究論文
 - ** 電々公社横須賀通信研究所
 - *** 京都大学工学部

信号の観測はダイポールアンテナにより行われ、電界強度として求められるが、信号の観測された伝搬時間から推定される電子密度を用いて磁界強度に換算された。信号が強い場合には衛星搭載の VLF 受信機が飽和するが、その効果を補正しても 0.1 pT より強い信号はまれであることがわかった。

そこで南極サイプル局から送信された信号が、導波管モードで電離層一大地間を伝搬し、電離層を透過してホイスラーモード伝搬して衛星に至る伝搬路について理論的に各部の減衰を計算して、実際に観測された信号強度が理論的にも予測されるものと大きな差のないことが示された。

1. はじめに

VLF 波動と磁気圏中の荷電粒子との間で起る波動一粒子相互作用の発生機構解明のため行われた EXOS-B/Siple 局実験で得られたデータについては、今までに数多くの新しい知見が得られている [1]~[5]。

この波動一粒子相互作用は一般に非線形現象であり、トリガー波の強度に大きく依存する。また、計算機シミュレーション等でこの現象を理論的に解明しようとする際にもトリガー波の強度は必要となってくる。本報告では、今回の実験期間中、科学衛星 EXOS-B で観測されたサイプル局信号の絶対強度の解析結果を示すとともに、ある仮定のもとで行った絶対強度の理論計算の結果を述べる。

2. サイプル局信号の絶対強度の観測結果

衛星では 103 m のダイポールアンテナによって、0.3~9 kHz のワイドバンドのデータが得られた。それを周波数解析して、サイプル局信号に対する周波数成分の強度を調べるわけであるが、サイプル局信号は波動一粒子相互作用の発生条件を調べる目的で、周波数を変化させ、ある周波数パターンをもっている [6]。一方、我々の強度解析システムでは特定の周波数成分の強度しか解析できない。そこで最も多く送信されている周波数、つまり送信パタンの中心周波数の成分の強度の解析を行った。

受信された信号が何 V/m であるかといった絶対強度を求めるには、既に強度のわかっている較正信号と磁気テープ上に記録されている観測信号とを比較すればよい。この較正信号は地上テレメータ追跡局で観測データと同じ磁気テープ上に記録されている。衛星に搭載されている VLF 受信機の特徴は既知であり、103 m のダイポールアンテナ系の特性も推定できるので、較正信号に対する電界強度がわかるわけである。較正信号が記録されていない軌道については、衛星から送られてくるワイドバンドのデータ中に含まれる強度の安定した基準信号を較正信号の代りとした。

こうして、求められた電界強度より、次式によって磁界強度 B と電力密度 P を求めることができる。

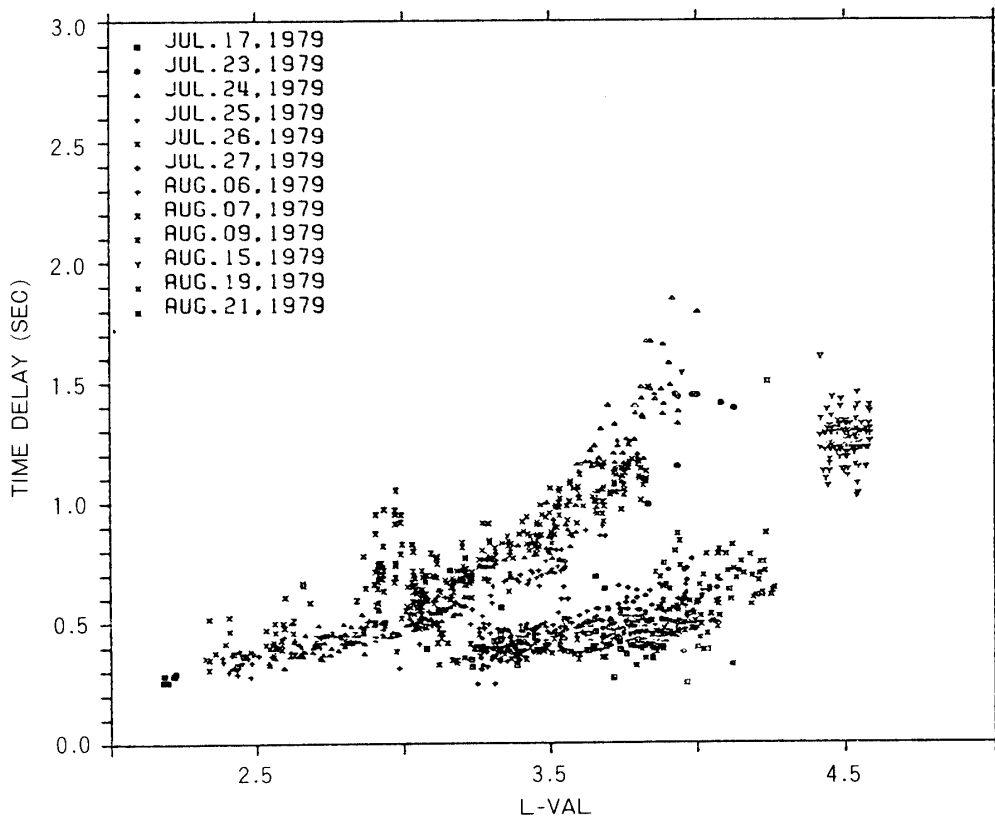
$$B = \frac{1}{c} \cdot \xi \cdot n \cdot E \dots\dots\dots (1)$$

$$P = \frac{1}{\mu_0} \cdot E \cdot B \dots\dots\dots (2)$$

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_H \sin \psi}{f_H \cos \psi - f} \right)^2}} \dots\dots\dots (3)$$

$$n = \frac{f_P}{\sqrt{f_H(f_H \cos \psi - f)}} \dots\dots\dots (4)$$

ここで n は屈折率, f, f_H, f_P , は信号周波数, 電子のサイクロトロン周波数, プラズマ周波数であり, ψ は $\mathbf{1K}$ ベクトルと外部磁場方向のなす角, c は光速, μ_0 は真空の透磁率である。

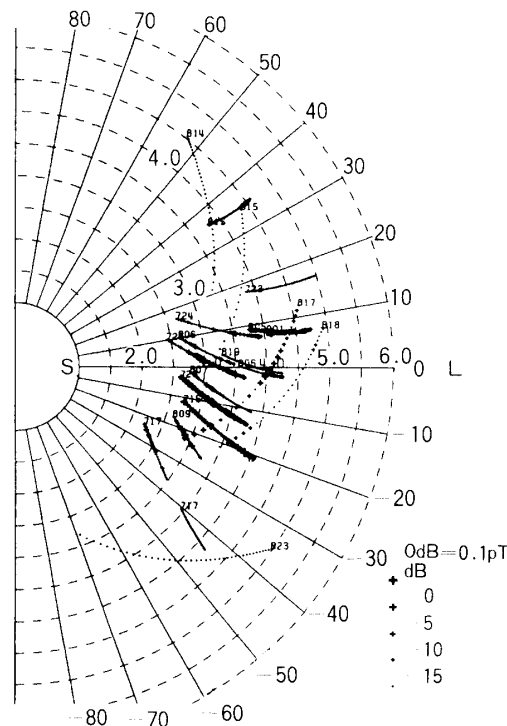


第1図 1979年夏期間, 磁気赤道面付近で観測されたサイブル信号の送信局からの伝搬時間。横軸は観測点の L 値。

屈折率 n を求めるためには、磁気圏における電子密度分布が必要となる。サイプル局信号が周波数パターンをもっているので、送信パターンと受信パターンを比較することによって、サイプル局信号が磁気圏中を伝搬するのに要した時間を測ることができる。第1図は1979年夏期間の観測で、ほぼ磁気赤道面近辺で観測されたサイプル局信号の送信局からの伝搬時間を観測点の L 値に対してプロットしてある。この図から明らかに伝搬時間は2つのグループに分けられるトレンドがあり、伝搬時間の大きい方は観測点がプラズマポーズの内側、小さい方は外側であることもわかっている。一方、ある電子密度分布モデルを仮定すれば、計算によってこの伝搬時間を求めることができ、実測値とよく合う電子密度分布モデルを決定することができる。

次に問題となるのは、wave normal angle ψ であるが、ダクト伝搬の場合には $\psi \approx 0$ とみなせ、ノンダクト伝搬の場合には一般に ψ は大きくなる。ところが $\psi \neq 0$ の場合でも電波の磁界強度 B の値は $\psi = 0$ の場合の B の値と 2dB ほどしか変わらないことがわかった。

この $\psi = 0$ の仮定と、前述の電子密度分布を用い、観測された電界強度から1979年夏の間におけるサイプル局信号の磁界強度を求めたのが第2図である。同心円の半径は L -value を表し、角度は磁気経度を表わしてある。つまり、この図は衛星の軌道を磁力線に沿って磁気赤道面に投影した図であり、磁界強度を濃さで表わし、数字は日付を示している。Sはサイプル局の磁気経度を表わしているが、サイプル局に近い磁気子干面内でサイプル



第2図 サイプル局信号の磁界強度の空間分布
衛星軌道は磁気赤道面に磁力線に沿って投影。
信号強度を軌道上で記号で表わしている。

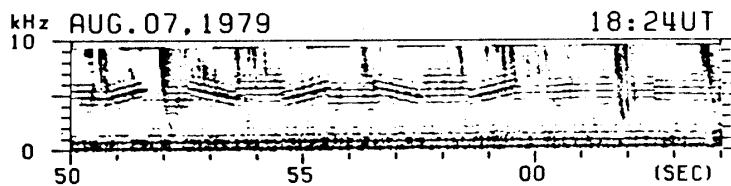
局信号は強く受信されているということがわかる。磁気圏中で VLF 波は同一磁気子午面内を伝搬すると考えられ、サイプル局から離れた磁気子午面内を伝搬する波はサイプル局から電離層下部までの自由空間中を伝搬する際に大きな減衰を受けるため、サイプル局の磁気子午面の近くで強く受信されたと考えられる。

3. VLF 受信機の飽和

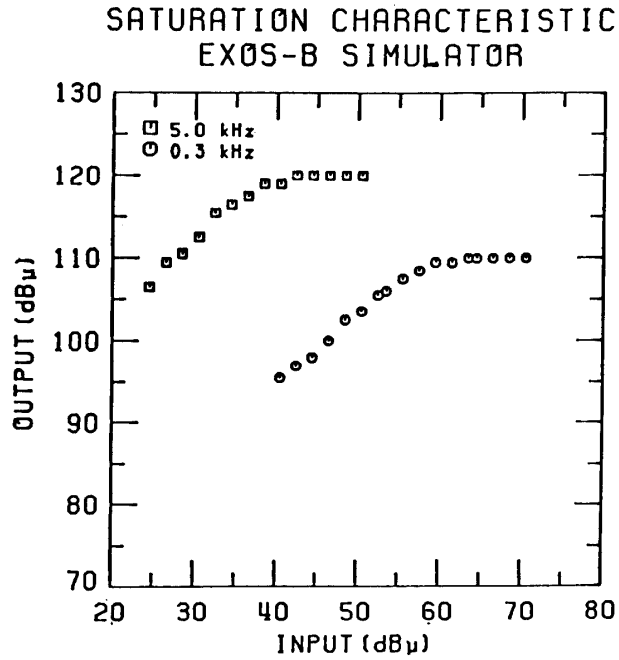
衛星に搭載されている VLF 受信機に大きな信号入力が入る場合、受信機は飽和してしまい、サイプル局信号は抑圧されて、実際より小さい値が地上に送られてくる。前節まではすべて、受信機の飽和はないとして、絶対強度を解析してきたが、飽和がある場合は、これを考慮する必要がある。

受信機の飽和によって起った現象と思われるものに、サイプル・サイドバンド現象というものがある。第3図はその現象の周波数スペクトルであるが、サイプル局信号の周波数の上下にサイプル局信号と同じパタンのサイドバンド状のものが受信されている。このサイドバンド状のものとサイプル局信号との周波数差は、この例では上下どちらのサイドバンドでも、ほぼ 0.6 kHz およびその整数倍である。一方、低周波域を見ると、0.3 kHz 付近に強いライン状エミッションがあり、その奇数次高調波も受信されている。衛星に搭載されている受信機と同じものを用いて再現実験を行ったところ、この現象は、0.3 kHz 付近のライン状エミッションのため受信機が飽和し、奇数次の高調波を生じ、かつサイプル局信号と混変調を起こしてサイプル局信号の上下に 0.3 kHz の偶数次の高調波分だけずれたサイドバンド状のものが生じたと結論された。

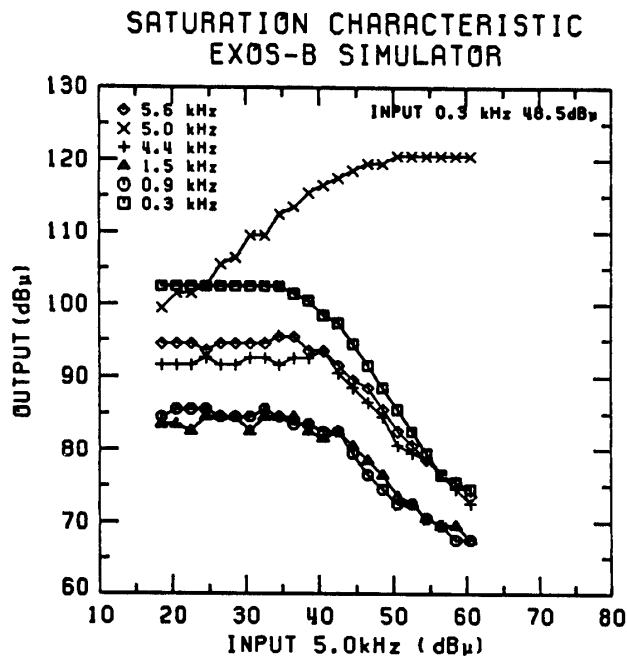
そこで、この現象を逆に利用して、受信機の飽和特性を詳細に調べることにより、飽和レベルを越える信号の入力レベルを推定することができる。たとえば、第4図に示してあるのは、衛星搭載受信機回路の 5 kHz と 0.3 kHz の単一周波数信号を入れた場合の入出力特性を示しているが、飽和レベルも受信機のゲインも周波数によって大きく異なっている。第5図には、受信機回路に 0.3 kHz と 5 kHz の記号を同時に加えた時の 5 kHz 記号の入力に対する各周波数成分の強度を示してある。0.3 kHz の入力レベルを変えて第5図のようなものを数多く取り、各周波数成分が実測値と最もよく一致するものをさがせば、実際にサイプル・サイドバンド現象が起った場合の 0.3 kHz と 5 kHz の入力レベルがわかり、飽和によって見かけ上、受信機のゲインはどれほど小さくなったかを求めることができる。第3図の8月7日の例について、飽和を考慮しなかった場合のサイプル局信号強度を第6図(a)に示し、上記のようにして飽和を考慮した場合の信号強度は同図(b)に示す



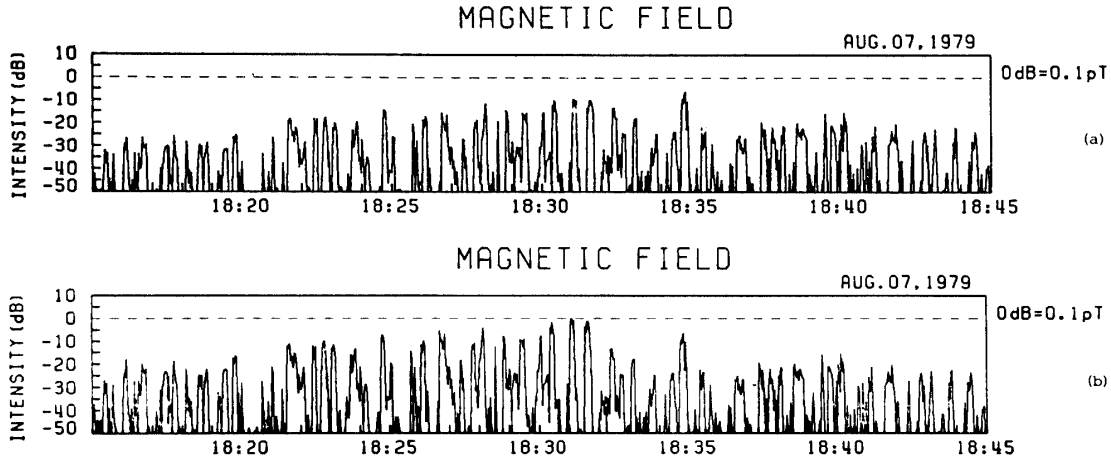
第3図 サイプル・サイドバンド現象の波動スペクトル



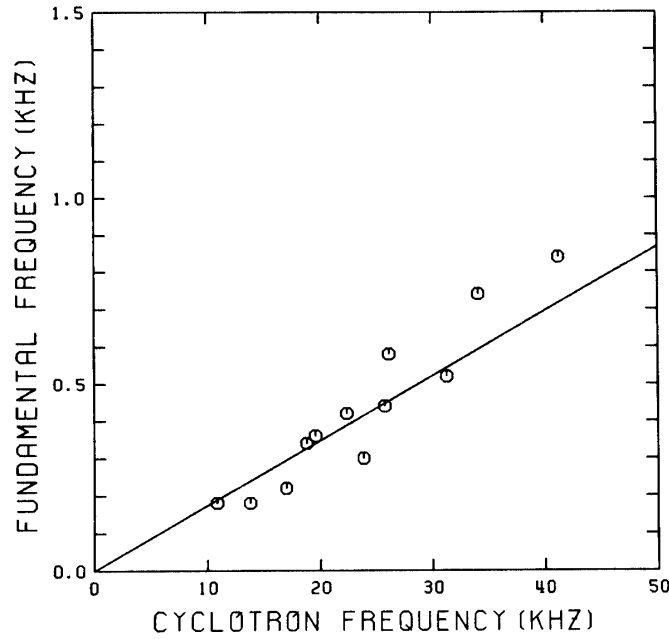
第4図 5 kHz と 0.3 kHz の単一周波数信号の入出力特性



第5図 5 kHz と 0.3 kHz の信号を同時に加えた時の各周波数成分強度の変化



第6図 飽和を考慮しなかった場合(a), と考慮した場合(b),
の強度の解析結果(8月7日の観測例)



第7図 ライン状エミッションの基本周波数と受信点
における電子サイクロトロン周波数の関係

ようになる。その差は5 dB~10 dBである。

なお、この日の例では、0.3 kHzの奇数次高調波も受信機の飽和特性のためであることはわかったが、0.3 kHzのエミッションはnaturalなものと考えられる。なぜならば、このような狭帯域の高調波を伴うエミッションは他にも9パスについて見られ、いずれも磁気赤道に近く、またプラズマポーズのすぐ外側で多く見られることと、その基本周波数が観測位置の電子サイクロトロン周波数に比例する(約1/57)ことがわかっているからである(第7図参照)。ただしこの基本周波数のエミッションの発生機構についてはよくわかって

いない。

最後に、この実験期間中、受信機はどの軌道でどの程度飽和しているかという問題であるが、サイプル局信号の強度が他の周波数成分に比べて大きい例があれば、解析は楽である。しかしそういう例はなく、2 kHz 以下あたりにヒスが存在するのが常である。また、低周波域では受信機のゲインが小さいのに、周波数スペクトル上はつきりわかるほどのヒスが観測されたということは、ヒスの入力レベルも大きく、これによって受信機が飽和しているということも十分考えられる。ただサイプルサイドバンド現象といった強いライン状エミッションの場合でも 10 dB ほどしか見かけ上ゲインが小さくならないことは、他の場合、飽和による補正量はこれより小さいと考えられる。

これらの結果を総合すると、第2図に示されたようにサイプル局の信号強度は受信機の飽和を考慮したとしても、0.1 pT を越える信号レベルは大変まれであると結論され、これは計算機シミュレーション等によく用いられるレベル (~ 1 pT 以上) と比べても意外に小さいことになる。

そこで、以下では送信電力から衛星までの伝搬通路損失を考慮して、理論的に予測を行い、上記の結果が妥当であることを示す。

4. 絶対強度の理論計算

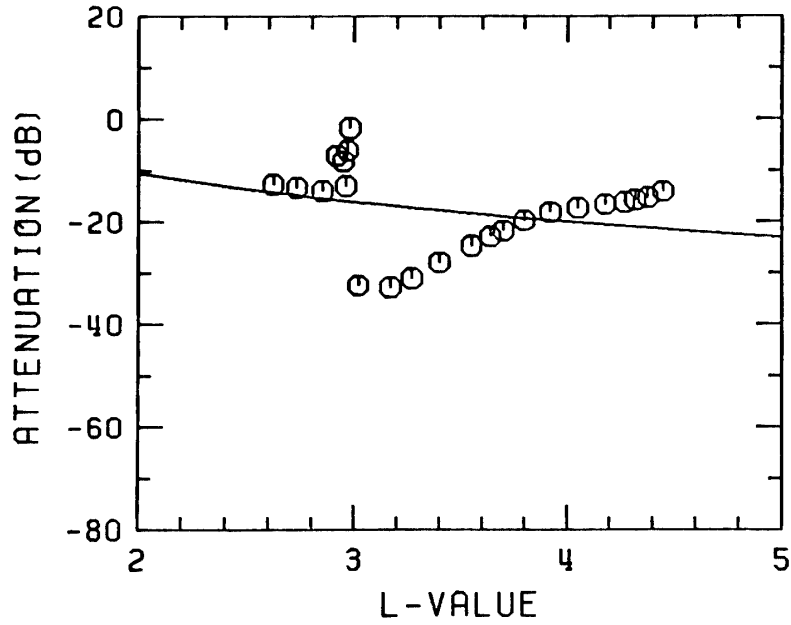
サイプル局から衛星までの伝搬を次の3つの部分に分けて考える。

- 1) 電離層上部から衛星までの磁気圏中の伝搬
- 2) 電離層中の伝搬
- 3) サイプル局から電離層下部までの自由空間中の伝搬

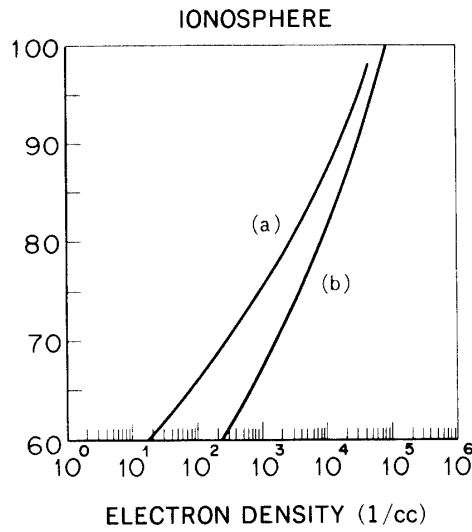
磁気圏中の伝搬形態には、ダクト伝搬とノンダクト伝搬の2種類があるが、どちらの場合でも VLF 波は同一磁気子午面内を伝搬すると考える。まず、ダクト伝搬の場合には、完全に磁力線に沿って伝搬すると考える。このとき、受信点の位置によって、波が磁力線に入射する点の位置を求めることができる。また、ダクトの断面積は磁気赤道面に近づくにつれて大きくなるので、ダクト中に含まれる電力が一定であるとすれば、電力密度は減少し、等価的に減衰を受けたと考える。

ノンダクト伝搬の場合は、ray tracing によって伝搬路がわかるので、ダクト伝搬の場合と同様に、受信点の位置から磁気圏入射点の位置を求めることができ、また伝搬路の広がりによって伝搬損失を求めることができる。ここで用いる電子密度分布は、プラズマポーズの内側は、拡散平衡モデルであり、外側は無衝突分布である。基準高度 ($h=1000$ km) における電子密度は $1.5 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 、イオン温度は 1000 K、地球半径で正規化したプラズマポーズの半実効幅は 0.05 であり、プラズマポーズの位置の L-value は 3 or 4 であり、基準高度におけるイオン組成比は $\eta_{H^+}=0.152$ 、 $\eta_{He^+}=0.823$ 、 $\eta_{O^+}=0.025$ とした。

第8図は、磁気赤道面における L-value と、磁気圏中での損失の関係を示したもので、実線がダクト伝搬の場合で、○印がノンダクト伝搬の場合を示してある。これは、プラズマポーズを $L=3$ のところにとった場合であるが、プラズマポーズの内側では、ダクト伝搬の場合もノンダクト伝搬の場合もあまり損失に差がないことがわかる。



第8図 磁気赤道面における L -value と磁気圏中での損失の関係 (ノンダクト伝搬とした場合)



第9図 電離層中の電子密度分布モデル
 a. 地磁気がほとんど荒れていない場合 ($\Delta H = -90\text{nT}$ 程度)
 b. 地磁気が少し荒れている場合 ($\Delta H = -200\text{nT}$ 程度)

次に電離層における波の減衰量を求めるには、Full-wave-solution という手法が用いられる。これは、平面層状異方性媒質中の電磁界分布を、マクスウェルの方程式を解くことによって得ようとするものである[7]。ところで、この手法を用いるためには、電離層中

の衝突周波数と電子密度の分布が必要となってくる。衝突周波数については一般に用いるものを、また、電子密度分布に関しては、南極でロケット実験の結果得られた多数の電子密度のデータから、地磁気の荒れをパラメータとして、電子密度分布を決定するという方法[8]を用いることにした。以下、磁場がほとんど荒れていない場合というのは、地磁気の水平成分の変動 ΔH が -90 nT の場合を指し、少し磁場が荒れているというのは、 $\Delta H = -200$ nT の場合を指す。それぞれの場合の電離層中の電子密度の分布が第9図の(a)、(b)である。

第10図には、磁気緯度 60° で下から電離層に入射するとして、磁場があまり荒れていない場合の電離層における減衰量がまた同図(b)には磁場が少し荒れている場合の電離層における減衰量がそれぞれトーンマップで示してある。縦軸が方位角であり、北が 0° 、東が 90° である。横軸は入射角を示し、南→北方向を正としてある。波の減衰量は、入射角によって大きく異なるが、方位角によってはあまり変化しないことがわかる。

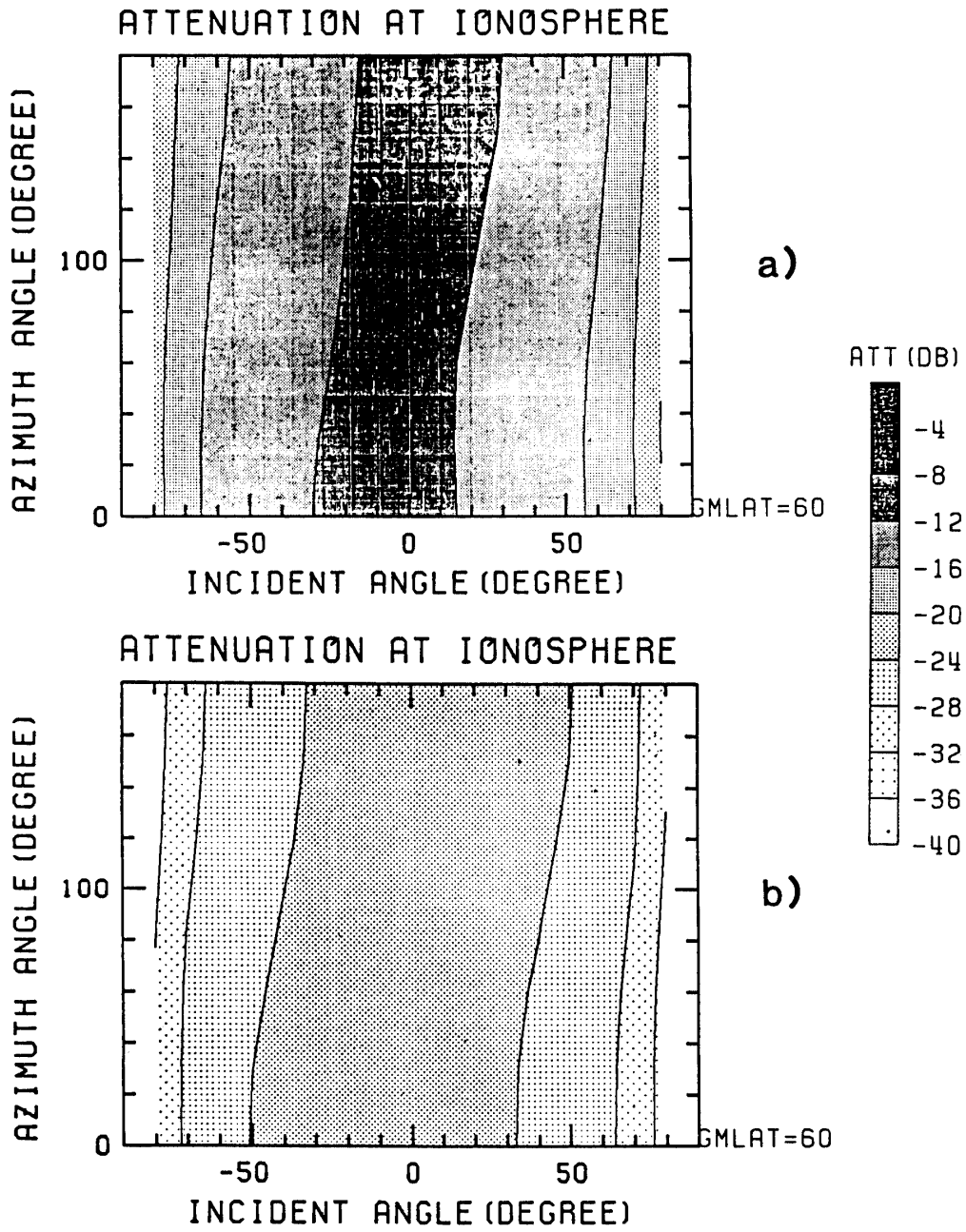
自由空間中での波の伝搬を考える場合、電離層へ波が入射する点がサイプル局から近い所であれば、直接波のみが自由空間中を伝搬すると考えることができるが、遠くなった場合、特にサイプル局から見通し外になる時には、電離層下部で反対した波がまた地表で反射して電離層へ入射するという反射波の存在を考えねばならない。この反射波を考慮に入れた場合の伝搬形態の解析方法には大きく分けて2つのものがある。1つは幾何光学的に、電離層と地表間を反射してきた波を合成して、その多重反射波の合成波が電離層に入射すると考えるものである。もう1つは、電離層下部と地表の間があたかも導波管を形成しているかのように考えて、ここでの電磁界分布をマクスウェルの方程式を解くことによって得ようとするもので、モード理論と呼ばれている。

まず、幾何光学的方法について述べる。地表における反射係数を 5 kHz の場合について求めると、 $1+j\cdot 0$ とみなすことができる。電離層下部における反射係数は、電離層が異方性媒質であるため、 $\perp R_{\parallel}$ といった成分が存在する。この反射係数行列は、先に述べた Full wave solution から求めることができ、南北伝搬の場合、磁場があまり荒れていない場合第11図(a)のようにまた、磁場が少し荒れている場合には同図(b)のようになる。今までは $\perp R_{\parallel}$ といった成分は小さいとして無視していたが、我々はこれらも考慮に入れ、各反射波の強度と位相を求めて合成を行った。その結果、自由空間中での減衰量は伝搬距離に対して、 2.40 dB/1000 km となった。

一方、モード理論の場合は、J.R.Waitの方法[9]に従い、球座標 (r, θ, ϕ) において $r \leq a$ に一様な地球、 $r \geq a+h$ に一様な電離層を仮定し、水平電気双極子のつくる電磁界分布を考えた。モード理論の場合、減衰量は伝搬距離に対して 2.53 dB/1000 km となり、幾何光学的な方法に近い値となった。以下では幾何光学的な方法によって計算を進めた。

第10図(a)、(b)に示してあるように、電離層における減衰量は入射角によって異なるので、実際には、各反射波がそれぞれの入射角に対する電離層減衰を受けたとして、電離層の上側で合成しなければならない。

また、サイプル局のアンテナは東西方向に布設されているので、方位角方向には指向性をもつ。この指向性は自由空間中での減衰量に影響を与える。今、このアンテナの指向特

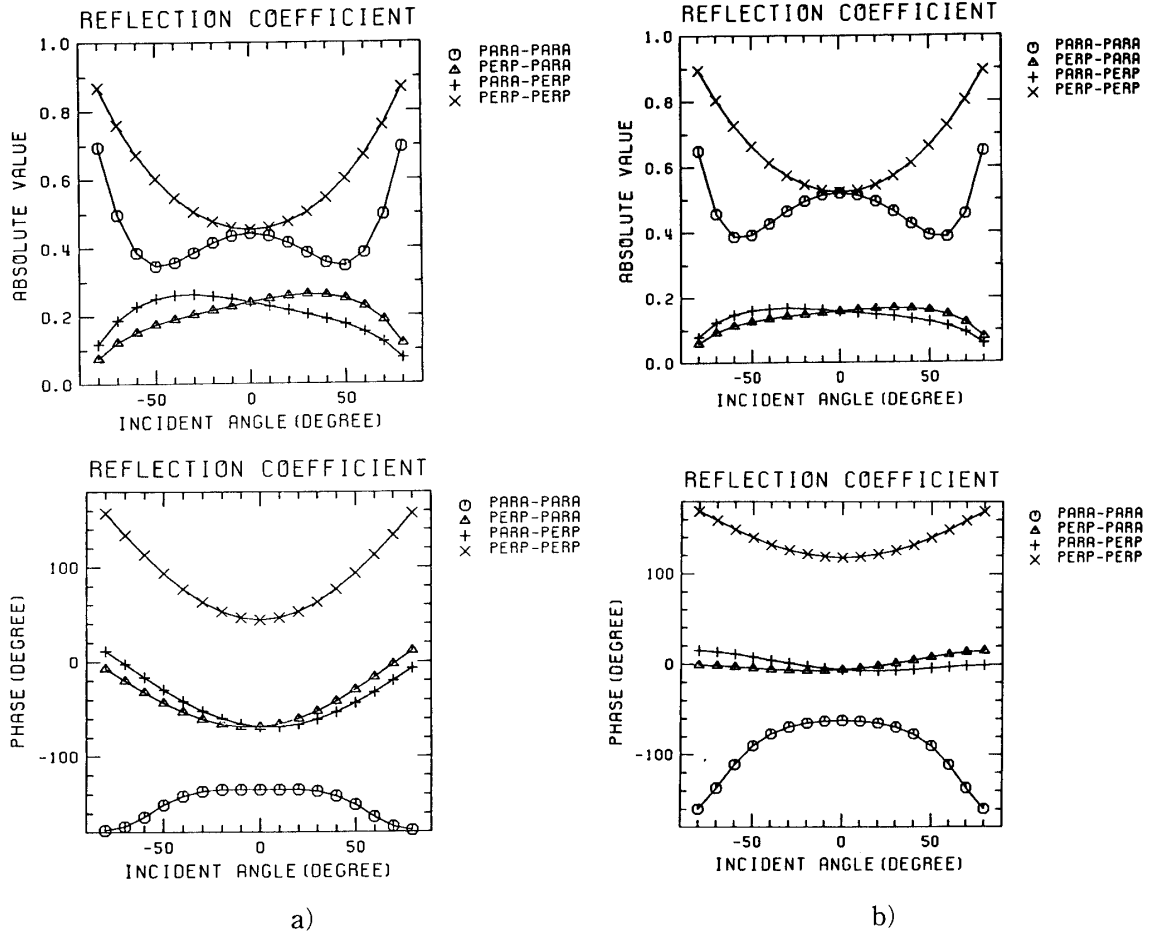


第10図 電離層通過の減衰量の入射角，方位角依存性

a. 下線電離層モデル第9図a)を使用

b. 下線電離層モデル第9図b)を使用

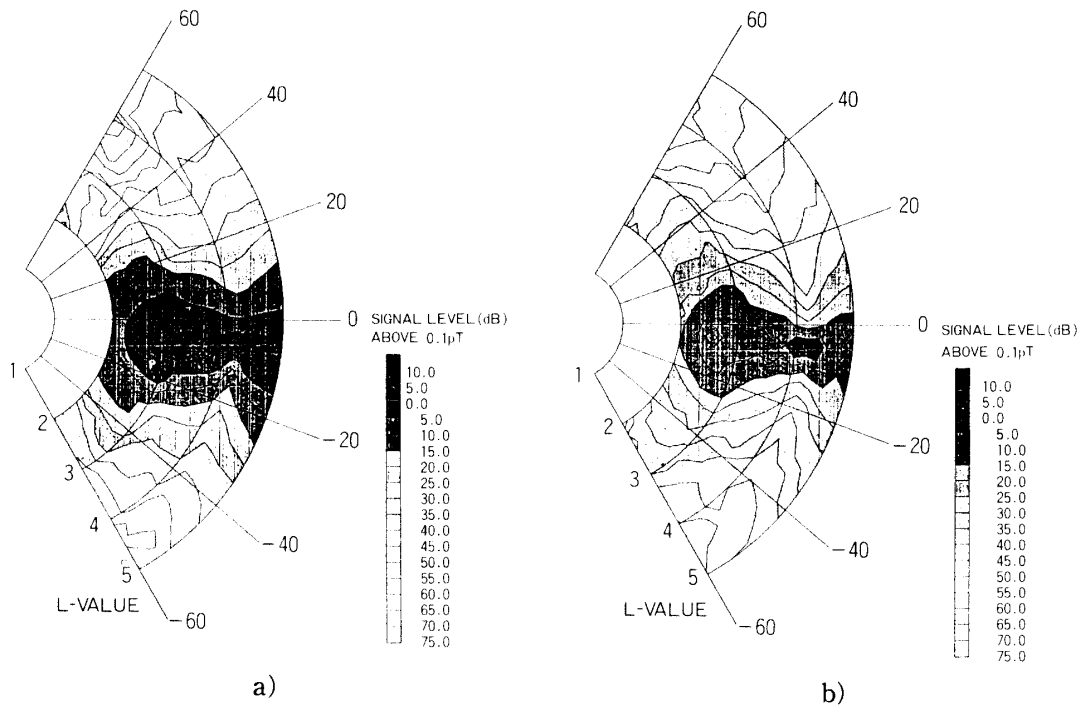
性は，大地の影響を考慮しない半波長ダイポールと同じであるとして計算した。



第11図 電離層下部における反射係数
図a, bは第10図と同様

5. 計算された磁界強度の空間分布

第12図(a)に示されてあるのは、磁場があまり荒れていない場合の電離層の電子密度分布を用い、プラズマポーズを $L=3$ の位置においてダクト伝搬を仮定した場合の磁気赤道面における磁界強度の空間分布を送信電力150 kW 放射効率1.5%として[10]、観測結果である第1図と同じスケールで描いてある。磁場が少し荒れた場合の同様な図が第12図(b)である。サイプルの磁力線に近いところと、 $L=3$ 付近で強度が強くなっていることがわかる。 $L=3$ のところで強度が強くなるのは、磁界強度が屈折率の平方根に比例することを考慮すると、プラズマポーズの内側で電子密度が急増するため、磁界強度も急増するからである。この図においても $OdB=0.1$ pTであるが、これより大きいものはサイプル局の磁気子午面近傍に限られていることがわかる。



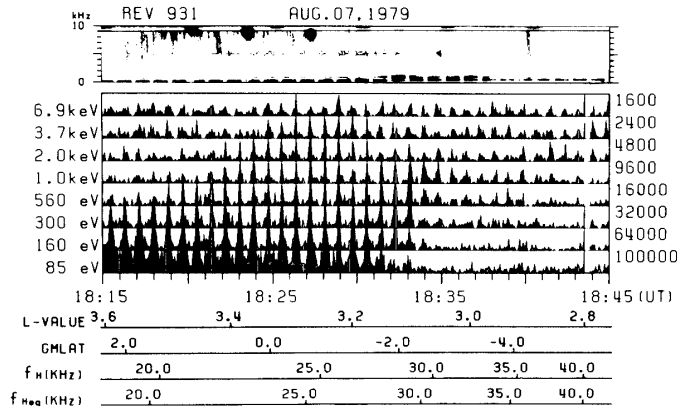
第12図 磁気赤道面における磁界強度の計算値
図a, bは第10図と同様

6. 観測値と計算値の比較

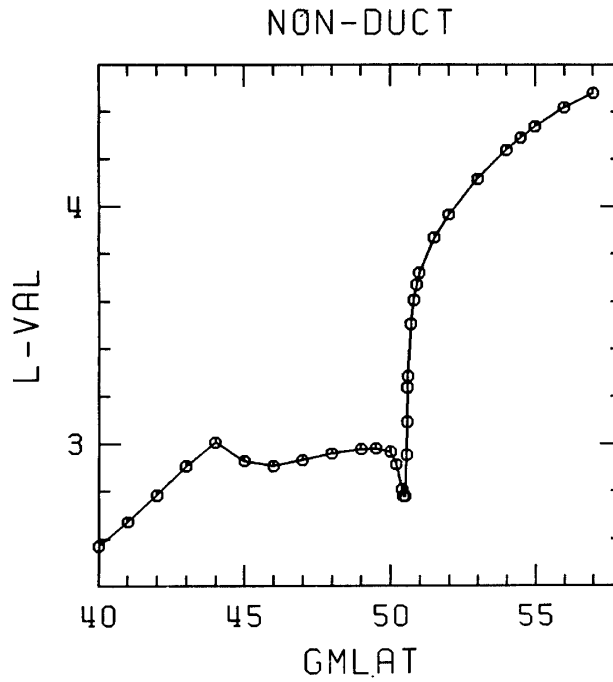
ここでは、8月7日の例について考える。第13図に示してあるのは、上から、0-10 kHzの波動スペクトル、各エネルギーチャンネルの電子フラックスの変化、衛星の軌道である。5.11 kHz付近にサイプル局信号が受信されており、その磁界強度の時間変化を示したのが第6図(b)であった。伝搬時間の解析の結果、この日は $L=3$ あたりにプラズマポーズがあると推定され、サイプル局信号はプラズマポーズの外側で強く受信されている。また、その時、電子フラックスにも強いピッチ角異方性がみられ、先に述べたサイプル・サイドバンド現象も生じている。ところで、衛星は磁気圏中を運動していて、サイプル局信号が数十分にわたって受信されている場合、その間ずっと衛星がダクト中にあるというのは考えにくい。ゆえに、ノンダクト伝搬だと考えられる。

第14図は、ray tracingによって得た、磁気圏入射時の磁気緯度と磁気赤道面における L -valueの関係を示しているが、入射磁気緯度がある範囲のところでは、 L -valueはほぼ $L=3$ となる。これは、プラズマポーズという急激な密度勾配のために、波がプラズマポーズにガイドされて伝搬するため[11]である。だから、受信点の L -valueが2.9~3.0の場合、磁気圏入射時の磁気緯度は一意的には決まらない。そこで、特定の L -valueに対する磁気圏入射緯度の最大値と最小値を求めて、夫々に対する電離層地表間伝搬の減衰を考慮して信号強度の予測値を求めこの範囲を未確定範囲として表わすことにする。

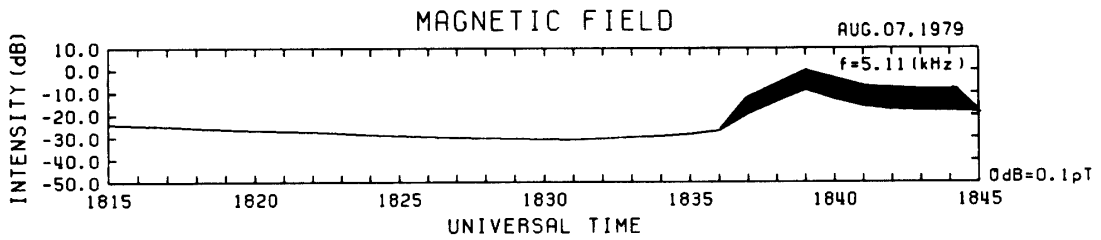
次に、電離層における電子密度分布を決定する際に必要となる地球磁場の荒れに関して



第13図 8月7日の波動と粒子のデータ



第14図 ノンダクト伝搬の場合の磁気圏入射時の磁気緯度と磁気赤道面における L-value



第15図 8月7日の磁界強度の計算値

は、まだ正確な値は得られていないが、前日の8月6日に磁場の荒れがあるので、少し磁場が荒れている場合のモデルを用いた。

このようにして求めた磁界強度の計算値の時間変化を示したのが、第15図である。第6図(b)と比較すると、1835 UT あたりまでの強度の増減の傾向が逆になっている。これは次のように解釈することができる。サイプル局信号が単に伝搬してきただけでは、強度は減少する傾向にあるが、高エネルギー側の電子のピッチ角異方性のため、波動-粒子相互作用が起これ、サイプル局信号が増幅を受けたと考えられる。異方性のピークがある1830 UT あたりで、波の強度は最大となり、異方性はなくなる1835 UT あたりで、波の強度も急減していることがそれをよく説明している。また、波動-粒子相互作用がほとんど起こっていないと思われる1835 UT 以降では、プラズマポーズを横切った後の1840 UT 頃まで増加し、その後減少して、ほぼ一定となる傾向が、計算結果と観測結果ともに見られ、かつ強度の値もよく一致していることより、この時は、波の伝搬特性のみで強度が変化したと考えられる。

7. 検討と結論

衛星に搭載されているVLF受信機が飽和した場合の絶対強度の解析は、まだ完全なものではないが、数dBの誤差の範囲で、衛星で受信されたサイプル局信号の絶対強度を求めることができ、また、ある仮定のもとに絶対強度を計算することができたが、今まで理論で仮定していた1 pT程度の値よりは小さい値が得られた。しかも、波動-粒子相互作用がないとした場合の観測値と計算値が比較的良好に一致しているため、実際に衛星で受信される波の強度はこのような値であろうと思われる。

1979年夏の実験期間中には、ASEが5例観測されているが、ASEといった強い波が受信された場合、VLF受信機は飽和していると考えられる。ゆえに、観測されたASEの絶対強度を求めるには、ASEが受信された場合の飽和特性を調べる必要がある。また、同時に計測されている粒子のデータ解析も進んでおり、波動-粒子相互作用の発生機構解明に大きく貢献することが期待される。

謝 辞

このEXOS-B/Siple局実験は、スタンフォード大学との共同実験として行われたものであり、ヘリウェル教授をはじめ、スタンフォード大学の共同研究者、また松本紘助教授をはじめ国内の共同研究者に謝意を表す。またEXOS-Bの運用に関しては、宇宙研の大林辰蔵教授、河島信樹助教授、東北大の大家寛教授、その他の関連の方々に厚く御礼申し上げる。電離層反射および透過係数の計算には金沢大長野勇助教授の作成されたプログラムを使用させて頂いた。ここに謝意を表す。

参 考 文 献

- [1] 木村, 松本, 向井, 橋本, 守倉, 佐々木, R.A.Helliwell, T.F.Bell, U.S.Inan, J.P.Katsufakis, 東大宇宙研究報告, 第16巻第4号(B), pp.1367-1380 (1980)

- [2] I. Kimura, H. Matsumoto, T. Mukai, K. Hashimoto, R.A. Helliwell, T.F. Bell, U.S. Inan, J.P. Katsufakis, *Adv. Space Res. Vol. 1*, pp. 197-202 (1981)
- [3] I. Kimura, H. Matsumoto, T. Mukai, K. Hashimoto, R.A. Helliwell, T.F. Bell, U.S. Inan, J.P. Katsufakis, "Relation between Laboratory and Space Plasmas", *Astrophysics and Space Science Library Vol. 84*, D. Reidel Pub. Co. pp. 331-338 (1981)
- [4] I. Kimura, H. Matsumoto, T. Mukai, K. Hashimoto, T.F. Bell, U.S. Inan, R.A. Helliwell and J.P. Katsufakis, *J. Geophys. Res.* (to be published in Jan., 1983).
- [5] T.F. Bell, U.S. Inan, I. Kimura, H. Matsumoto, T. Mukai and K. Hashimoto, *J. Geophys. Res.* (to be published in Jan., 1983).
- [6] 木村, 松本, 橋本, 向井, T.F. Bell, U.S. Inan, J.P. Katsufakis, R.A. Helliwell, 惑星プラズマ圏および磁気圏研究会プロシーディング第1部 pp. 1~9 (1979).
- [7] 長野, 満保, 山川, 木村; 南極資料 68号 pp. 203-214 (1980).
- [8] 宮崎, 小川, 森; 電波研究所季報 Vol. 26, No. 141, pp. 855-861 (1980).
- [9] J.R. Wait; *Electromagnetic Waves in Stratified Media* Pergamon Press (1970).
- [10] R. Raghuram, R.L. Smith, T.F. Bell, *IEEE Trans. AP-22*, p.p. 334-338 (1974).
- [11] U.S. Inan, T.F. Bell; *J. Geophys. Res. Vol. 82*, pp. 2819-2827 (1977)