

VLF 送信電波を用いたホイ斯拉モード波の共役点観測

高橋 修*, 太田 健次**, 早川 正士***, 馬場 清英**, 江口 博之**

Whistler Mode Signals from the VLF Transmitter
Observed at Conjugate StationOsamu TAKAHASHI*, Kenji Ota**, Masashi HAYAKAWA***,
Kiyohide BABA**, and Hiroyuki EGUCHI**

(Received March 31, 1990)

In order to study the propagation mechanism of whistlers, especially the arrival direction and polarization, we have developed the field-analysis direction finding method. But these studies are based on the radiation from lightning around the geomagnetic conjugate point. To estimate spatially coherent propagation mechanism of whistler waves in a field-aligned duct, we have observed whistler mode signals (23.9 kHz) at conjugate point at Ceduna (geographic coordinated 32.1°S, 133.7°E) in Australia propagated from the VLF transmitter at Khabarovsk (48.5°N, 134.9°E) in U.S.S.R. This is because the characteristics of the transmitting signal (place, frequency, power) are known so that the propagation mechanism can be well understood.

1. まえがき

ホイ斯拉は雷放電で発生する電磁波を波源とし、地球の磁気圏プラズマ中をおおむね地磁気力線に沿って伝搬するVLF帯の電磁波である。ホイ斯拉の発生には波源である雷放電の発生と電離層上昇透過、磁気圏伝搬、電離層下降透過における好条件伝搬メカニズムが必要であることは広く知られている。しかし、これらのホイ斯拉発生要素がホイ斯拉の発生にどの程度関与しているかは明かではない。これは、波源の雷放電発生地点とホイ斯拉の観測される地点は地磁気力線上の共役半球にあり、同時にそれらの活動を把握することが極めて困難である

ことに起因している。ホイ斯拉、及びエミッション等の自然電波の観測に基づく受動的研究に対し、波源の特性が既知であるVLF送信電波を用いた能動的な研究もなされている。しかし、VLF局はその設備が極めて大規模であり移動が不可能なためホイ斯拉モードの観測は限られた共役半球でのみ可能である。

今回、日本（代表者名古屋大学空電研究所助教授早川正士）—ソ連（代表者IZMIRAN研究所教授O. A. Molchanov）の共同研究として“VLF送信電波を用いた内部磁気圏波動・粒子相互作用の研究”が企画され、その研究の一部としてVLF送信電波を用いたホイ斯拉モード波の共役点観測を行なった。本論文においてはこの観測に用いたシステムと観測の予備解析結果の一例について報告する。

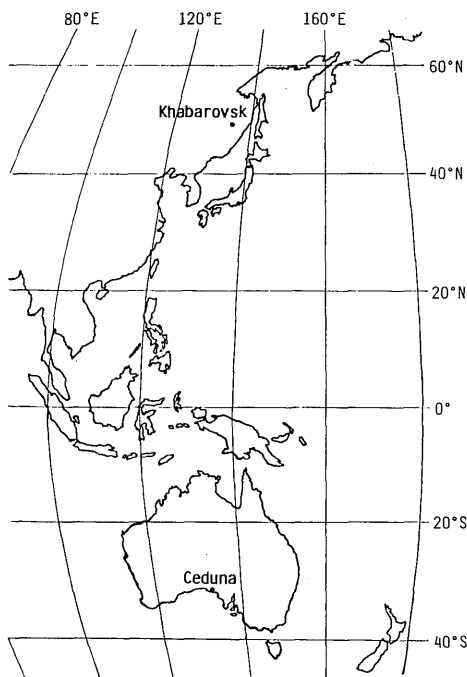
*現 工学研究科電気工学専攻 (Department of Electronic Engineering)

**電子工学科 (Department of Electronic Engineering)

***名古屋大学空電研究所 (Research Institute of Atmospherics)

2. ホイスラモード波の能動観測

地球磁気圏プラズマ中を伝搬する波動を地上観測で研究するには二つの手法がある。一つは、ホイスラ及びエミッション等の自然電波の観測に基づく受動的研究である。他の一つは波源の場所、電力、周波数等の特性が既知の送信電波を用いてその共役点において送信された波の応答を見る能動的な研究である。これらは互いに相補的な関係にあるが、電離層上昇透過、磁気圏内伝搬、及び電離層下降透過の伝搬メカニズムを知るには特性が既知であり、かつ又周波数や電力が可変である能動実験が有利である。VLF送信電波による磁気圏波動の実験を行っているのは、米国スタンフォード大学（地磁気緯度 60° ）¹⁾とソ連イヅミラン研究所（同 52° ）²⁾だけである。これらはともに外部放射線帯電子との相互作用により新しい波の励起を引き起こすものである。しかし、これら極域の緯度より低い内部磁気圏でのVLF送信電波による波動実験は極めて少数の報告がなされているに過ぎない³⁾。そこで、高緯度のソ連・ハバロフスクVLF送信局（Khabarovsk, 地理座標 $48^\circ 30'N$, $134^\circ 51'E$, 地磁気緯度 $38^\circ N$ ）から23.9 kHzの周波数で電力を可変する特別送信を企画し、その共役点であるオーストラリア・セドナ（Ceduna, 地理座標 $32^\circ 07'S$, $133^\circ 42'E$, 地磁気緯度 $40^\circ S$ ）においてホイスラモード伝搬波の観測を行なった。第1図にハバロフスクとセドナの位置関係を示す。



第1図 ハバロフスク送信局とセドナ受信点の位置関係

通常、VLF波の電波は大地と電離層間の多重反射により光速で遠距離に伝搬する。この伝搬モードを導波管モード伝搬と言う。一方、地球の磁力線に沿って電離層を上昇透過し、磁気圏プラズマ中を伝搬した後、再度電離層を下降透過し反対半球に到達する伝搬モードをホイスラモード伝搬と言う。ホイスラモード波の伝搬時間 t (sec)と電波の周波数 f (Hz)には

$$t = Df^{-1/2} \quad (1)$$

の関係式があり、 D は伝搬通路におけるプラズマ中の物理量で定まるパラメータで、この値を分散値と言う。通常、ホイスラモード伝搬は雷放電を波源とする電磁波によって反対半球で観測されるホイスラとして知られている⁴⁾。我々は低緯度で発生するホイスラの到来方向と偏波特性を電磁界解析法により求めてきた⁵⁾。しかしながら、雷放電の位置、強度、周波数成分等が明かでないため、磁気圏プラズマ中を伝搬する波が受ける細かな特性を解明するには最適とは言えない。そこで、VLF局の電波を利用すれば、位置、強度、周波数は既知であり、より詳しい伝搬メカニズムの解析が可能と考えられる。しかしながら、VLF局は位置と周波数が固定であり、かつ又測定にはその局の反対半球へ行く必要がある。よって、雷放電を波源とするホイスラの研究とVLF局の送信電波を用いたホイスラモードの研究とは相補的な関係にある。観測を行なった期間は1989年8月9日から8月24日までの16日間であり、その電波の送信時間帯と発信出力の状態を第1表に示す。送信時間の1秒は1

第1表 ハバロフスクにおけるVLF局送信の時間帯

時間帯	時間(s)	発信出力
22:00~22:20	1	Normal
22:20~22:30	32	Normal
22:45~23:05	1	Half
23:05~23:15	32	Half
23:30~23:50	1	Normal
23:50~0:00	32	Normal
0:15~0:35	1	Half
0:35~0:45	32	Half
* 01:00~01:30	1	Normal
* 01:30~02:00	32	Normal

注). Normal: 出力1000kW

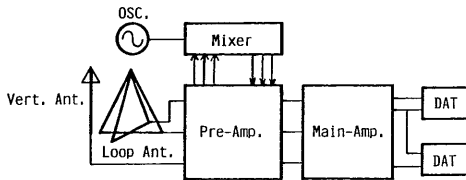
Half: 出力500kW

*: 偶数日のみ

秒送信2秒停波の繰り返し, 32秒は32秒送信32秒停波の繰り返しを意味し, 01時00分以降の送信は偶数日のみ行なわれた。本論文においては, 観測装置の概要と観測されたハバロスクとセドナ間のホイスラモード伝搬の代表的な予備解析データについてのみ報告する。

3. 観測装置の概要

第2図に観測装置のブロック図を示す。アンテナ部は

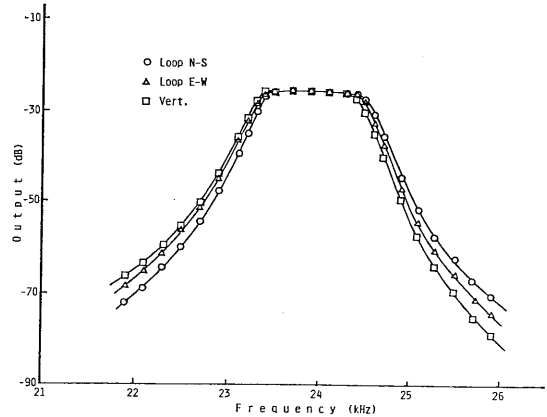


第2図 観測装置のブロック図

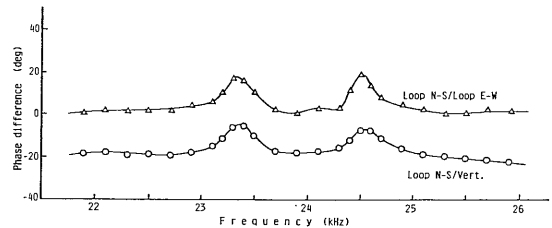
底辺16m, 高さ10mの三角形直交ループアンテナ ($L_a = 265 \mu\text{H}$, $r_a = 1 \Omega$) と高さ10mのバーティカルアンテナ ($c_a = 120 \text{ pF}$) で構成されており, 雷放電で発生するホイスラとハバロスクから送信される23.9 kHzの電波を受信する。図中に示すPre-Amp部は直交ループアンテナとバーティカルアンテナに誘起する水平磁界二成分と垂直電界一成分を増幅するものであり, ホイスラ, 及びエミッション等の自然電波を観測するため2~6 kHzのBPFを挿入した40~80 dB利得の低雑音増幅器である。詳しくは参考文献(6)を参照されたい。Mixer部はハバロスクから送信される23.9 kHzの三電磁界成分の信号を23.9 kHz $\pm$ 600 HzのBPFで選択増幅した後, 14.9 kHzの局部発振出力とともに混合回路に導き9.0 kHzの信号に変換した後, Main-Amp部へ導く。23.9 kHzを9.0 kHzに変換するのは23.9 kHzの信号波の振幅と位相情報を直接長時間に亘り正確に記録する簡単な手法が確立されていないためである。Main-Amp部ではPre-Ampで増幅された2~6 kHzの信号波とMixer部で23.9 kHzから9.0 kHzに変換された信号波とをDATの録音レベルまで0~40 dBの利得で増幅する。録音部は2台のDAT (Digital Audio Tape recorder) で構成されている。この2台のDATにはNSループアンテナの信号が共通に入っており, 各DATの同期が確保される。よって, NSループアンテナの信号を基準とし各アンテナ間の振幅と位相情報が記録される。観測データは大学に持ち帰った後, 40 μs の変換速度で12ビットのA/Dコンバータによってデジタル化され, 1024のデータ長でFFT解析を行なう。各アンテナで検出した電磁界成分の振幅と位相情報より, ホイスラモードで伝搬する波の到来方

向と偏波特性が求められる⁹⁾。

観測装置の23.9 kHz帯域における利得特性を第3図に, 位相特性を第4図に示す。



第3図 23.9 kHz帯域の利得一周波数特性



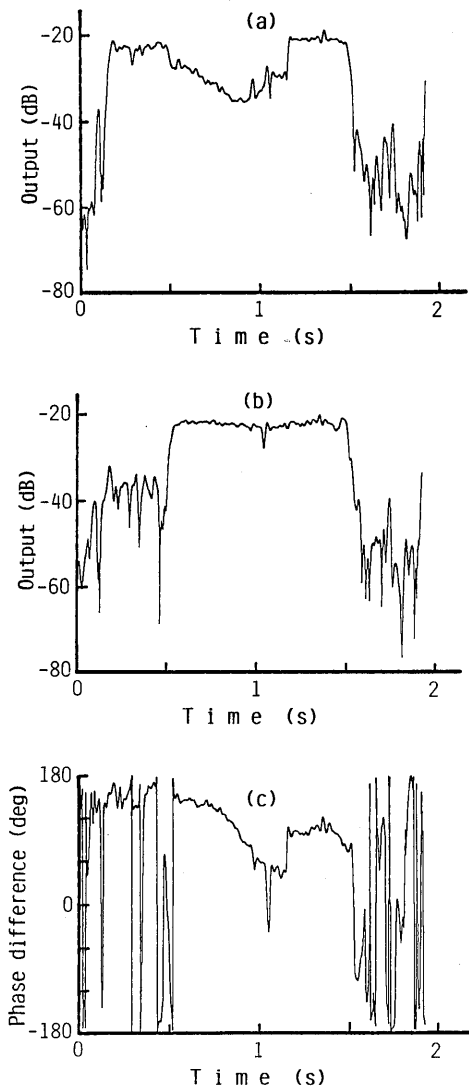
第4図 23.9 kHz帯域の位相一周波数特性

4. 観測データの一例

ハバロスクから送信されたVLF波の周波数23.9 kHzは14.9 kHzの局部発振回路と混合回路により9.0 kHzに変換され, サンプリング周期40 μs のA/D変換と1024データ長でのFFT解析により, 周波数分解能は24.4 Hzとなる。よって, 9.0 kHz前後の周波数は8.984 kHz, 9.009 kHz, 9.033 kHzである。しかし, 我々の解析結果では8.887 kHz~8.911 kHzに最大振幅強度を示した。これは, ハバロスクからの送信周波数が23.9 kHzから100 Hzずれていたことが後に確認されている。よって, 以後の解析では最大振幅を示した8.911 kHzの周波数についてのみ行なった。

ここでは観測された代表的な一例として, 1989年8月

19日22時10分18秒に送信された1秒間のデータをFFT解析した結果について述べる。第5図は直交ループアンテナで検出された23.9 kHz信号波の振幅と位相差を示す。(a)図はNS方向に展張されたループアンテナによって受信された磁波のEW成分振幅, (b)図はEW方向に展張されたループアンテナによって受信された磁波のNS成分振幅, (c)図は各ループアンテナ間の位相差(磁波NS成分-磁波EW成分)を示す。以後, NS成分とは磁波のNS成分振幅を示す。同様に, EW成分とは磁波のEW成分振幅を示す。



第5図 FFT解析による23.9 kHz信号の振幅と位相差 ((a)磁波のEW成分振幅, (b)磁波のNS成分振幅, (c)位相差 磁波のNS成分振幅-磁波のEW成分振幅)

(1)導波管モード波の伝搬

ハバロスクからの送信される23.9 kHzが停波されている時間帯においてはEW, NS成分とも約-60 dBから-50 dB程度の雑音レベルで振幅が大きく変動しているのが見られる。23.9 kHzの送信とともにEW成分は約-22 dBまで上昇し早い変動が見られるが, NS成分は約-35 dBまでしか立ち上がらない。これは, NSループアンテナ指向特性の最大感度がハバロスク方向にあり, ハバロスクより送信した時点で導波管モードの電波を検出したことがこのレベル変動で分かる。一方, EWループアンテナ指向特性はハバロスク方向が最低感度であり, 導波管モードで到来する電波では-35 dB程度のレベルに留まっている。また, 位相差(NS成分-EW成分)は $150^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 程度になっていることが分かる。この部分が導波管モードの伝搬特性を示している。

(2)導波管モード波の伝搬とホイストラモード波の伝搬による混在モード波

23.9 kHzの送信開始後, 約0.3秒を経てEW成分は約-22 dBより-28 dBまで急激に減少する。そして, その後徐々に強度が弱まり, 約-35 dBより再び上昇を始め-30 dBまで戻す。一方, NS成分は-35 dBより約-22 dBのレベルに上昇し, その後このレベルを保つ。このEW, NS成分のレベル変動はハバロスク近傍より地磁気力線に沿って磁気圏プラズマ中を伝搬するホイストラモード波が(1)式で与えられる時間だけ遅延し, 観測地点の上空近傍より到来していることを示している。このレベル変動を示す遅延した時間差を求め, (1)式より分散値が求められる。NS成分のレベル変動は約+15 dBであり, NS成分の多くがホイストラモード波によるものであることを示している。この状態は約0.7秒連続して続くがEW成分とNS成分では異なったレベル変動が見られる。EW成分のレベル変動は各種の原因を考慮する必要があるが, 主として導波管モード波のフェージング現象によるもの, または導波管モード波とホイストラモード波の干渉によるものと考えられる。しかし, 別に行なった32秒のデータ解析によるとEW成分とNS成分のレベル変動の周期が異なることよりこの変動は導波管モード波とホイストラモード波との合成により生じたものであり, この二波の振幅強度と位相差により合成波の振幅が大きく変動するものと考えられる。

(3)ホイストラモード波の伝搬

次に, 送信開始より1秒後に停波されるとEW成分の受信レベルは約-21 dBまで上昇し, 約0.3秒経過した後-55 dB程度の雑音レベルに戻る。このレベル変動はハバロスクの送信が停波されると同時に導波管モードの波は消滅し, ホイストラモードの波のみが約0.3秒間持続

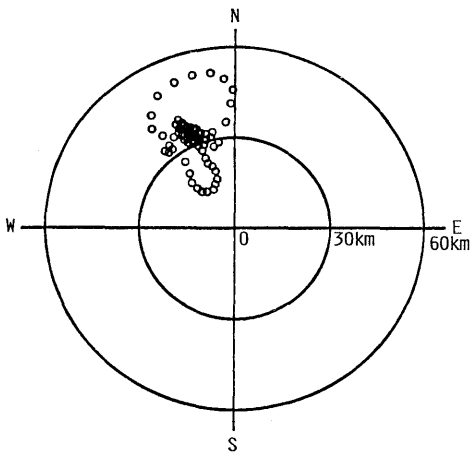
したことを示す。この時間差からも前記と同様にホイスラモード波の分散値が求められる。一方、NS成分においては送信開始より0.3秒以降ほぼ一定のレベルを保ち、1秒後に停波された後の約0.3秒間もほとんどレベル変動が見られない。そして、ホイスラモード波が消滅した後約-50 dBの雑音レベルに戻る。このことから、(2)で得た結果と同様にNS成分のほとんどがホイスラモード波によることを示しているものと考えられる。

同様にしてNSループアンテナとパーティカルアンテナに誘起する信号波を解析することにより、各アンテナ出力間の振幅と位相特性が得られホイスラの到来方向と偏波特性が求められる⁶⁾。

以上より、ハバロスクから送信されるVLFの電波を地磁気力線の共役点であるセドナで受信することにより、導波管モード波、導波管モードとホイスラモードの混在波、及びホイスラモード波の3種類の伝搬波が受信される。

5. ホイスラモード伝搬の解析例

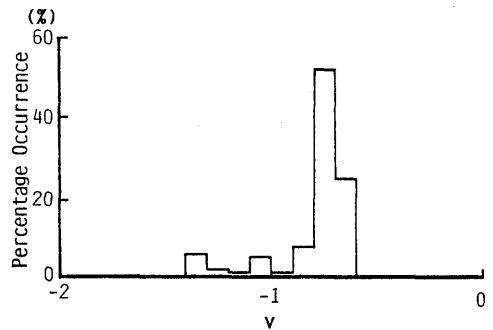
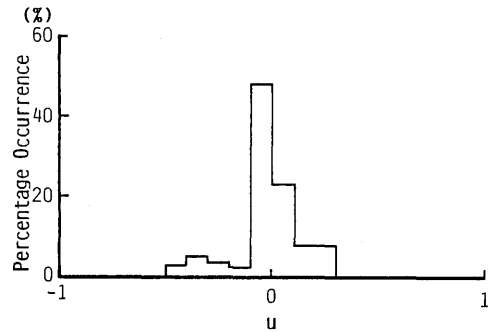
解析されたホイスラモード伝搬波の振幅と位相差のデータを用い、到来波の入射角 i と方位角 θ を求め⁶⁾、電離層の高さを100 kmと仮定した電離層下降透過点を第6図に示す。



第6図 ホイスラモード波の電離層下降透過点

図より、ハバロスクから送信された23.9 kHzのホイスラモード伝搬波はセドナにおける観測地点のほぼ北北西40 kmに電離層下降透過点が存在することを示している。ホイスラモード波の持続するこの約0.3秒の時間帯においては電離層下降透過点の移動は半径20 km以内であり、極めて安定した伝搬通路が存在しているもの

と考えられる。第6図で求められたホイスラモード波の偏波特性のパラメータ u 、 v ⁶⁾を第7図に示す。偏波パラメータ u は0に中心があり v は-0.7から-0.8に集中している。これより観測されたホイスラモード波の偏波特性は左旋性（北半球での右旋性）のほぼ円偏波であることを示している。



第7図 ホイスラモード波の偏波特性

これらの解析結果は低緯度において我々がすでに求めた雷放電によるホイスラの下層透過点の広がり、及び偏波特性とほぼ同一傾向を示した⁶⁾。但し、ホイスラは2~6 kHzの広周波数帯域に亘り、かつ又その放電特性も自然電波であるため単一ホイスラの到来方向と偏波特性のばらつきの広がりには23.9 kHzの単一周波数のホイスラモード特性に比べ大きい。しかしながら、3秒後に発生する23.9 kHzのホイスラモードの電離層下降透過点は30 km程度移動しているのが確認されている。またさらに、10分程度の時間間隔では100 km以上移動していることも観測されており、その偏波特性も左旋性より右旋性へ、そして円偏波より楕円偏波へと大きく変動するのが解析されている。このような電離層下降透過点の大幅な移動と偏波特性の変動は低緯度ホイスラでは観測

されておらず⁷⁾, 高緯度におけるダクトの径の広がり, またはダクトの移動を示すものとも考えられる。第1表で示される送信時間帯でのホイスラモード波の到来方向と偏波特性を連続解析することによりホイスラモード波の伝搬メカニズム⁷⁾や, 波動・粒子の相互作用⁸⁾が詳しく求められるものと考えている。

6. むすび

ホイスラの発生源である雷放電とその電磁波の電離層上昇透過, 磁気圏伝搬, 電離層下降透過の好条件伝搬メカニズムが地上で観測されるホイスラに不可欠な要素である。これらの要素がホイスラの発生にどのように関与するかを知るため, 波源の特性が既知であるソ連・ハバロフスク (Khabarovsk, 地理座標 48°30'N, 134°51'E, 地磁気緯度 38°N) の VLF 送信電波を用い, その地磁気力線の共役半球であるオーストラリア・セドナ (Ceduna, 地理座標 32°07'S, 133°42'E, 地磁気緯度 40°S) においてホイスラモード波を受信する能動観測を計画し, 1989年8月9日から8月24日までの16日間夜間ホイスラモード波の観測を行なった。この観測の予備解析結果では, ホイスラモード波の電離層下降透過点は観測地点の近傍にあり, 右旋性, 左旋性の円偏波, 楕円偏波で到来しており, 下降透過点の移動も観測されている。今後さらに解析を進め, ホイスラモード波の発生, 電離層下降透過点の到来方向, 偏波特性の時間的変動について細かな解明を行なう予定である。

7. 謝 辞

本観測は本学特別研究費と海外研修の特別研究旅費によって行なわれたものであり, 大学関係各位に心より御礼申し上げる。また, 本研究に対し常に御支援頂き, か

つ又勇気付けて頂く電子工学科三上 修教授, 西脇 彰助教授に深謝する。本観測のVLF送信波はソ連・IZMIRAN研究所 O. A. Molchanov 教授の特別企画によるものであり, その御支援に対し感謝する。

参 考 文 献

- (1) Carpenter, D. L.: "Fast fluctuation in the arrival bearing of magnetospherically propagating signals from the Siple, Antarctica, VLF transmitter", J. Geophys. Res., 85, 4157, 1980.
- (2) O. A. Molchanov: "VLF waves and wave-particle interactions in the magnetosphere", Nauka, 87, Moscow, 1985.
- (3) Tanaka, Y., M. Nishino and M. Hayakawa: "Conjugate measurements of VLF transmitter signals at middle latitude ($L = 1.93$)", Planet. Space Sci., 35, 8, 1053, 1987.
- (4) Helliwell, R. A.: "Whistlers and related ionospheric phenomena", Stanford Univ. Press, Stanford, Calif., 1965.
- (5) Ohta, K., M. Hayakawa and Y. Tanaka: "Ducted propagation of daytime whistlers as deduced from the ground-based direction finding", J. Geophys. Res., 89, 7557, 1984.
- (6) 太田, 早川, 馬場, 江口: "低緯度ホイッスラーにおける到来方向の周波数依存性", Res. Lett. Atmos. Electr., 9, 43, 1989.
- (7) Ohta, K., M. Hayakawa and S. Shimakura: "Frequency dependence of arrival direction and polarization of low-latitude whistlers and their ducted propagation", J. Geophys. Res., 94, A 6, 6975, 1989.
- (8) Pascal, E. W. and R. A. Helliwell: "Phase measurements of whistler mode signals from the Siple VLF transmitter", J. Geophys. Res., 89, A 3, 1667, 1984.