

低緯度ホイ斯拉の導波管伝搬特性

清水 明雄*, 太田 健次**, 江口 博之**, 早川 正士***

The Characteristic of Waveguide Propagation of Whistlers at Low Latitude

Akio SHIMIZU*, Kenji OTA**, Hiroyuki EGUCHI**,
and Masashi HAYAKAWA***

(Received May 31, 1993)

The characteristics of subionospheric propagation of whistlers have been investigated by means of digital spectral analysis with high temporal resolution and of our field-analysis direction finding measurement.

It is found that very low latitude whistlers having propagated in the Earth-ionosphere waveguide over the distance of the order of 1000km, exhibit very clear dispersion effects near the cutoff frequencies of the subionospheric 1st- and higher- order modes.

Furthermore, the wave components at the cutoff frequencies are found to be left-handed circularly polarized with nearly vertical incident angles, while those at frequencies away from the cutoff frequencies are left-handed (or liner).

These characteristics would be useful to study the ionospheric transmission mechanism, the excitation of subionospheric modes by a downgoing whistler, etc.

1. まえがき

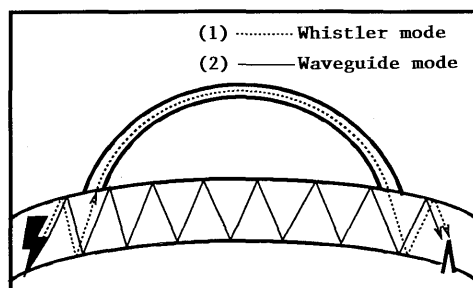
雷放電によって発生する電磁波には2つの伝搬モードがある。その1つは、第1図の(1)で示すように雷放電の電磁波が電離層を上昇透過して、地球の磁力線に沿った周囲電子密度より濃いダクトと呼ばれる伝搬路を通り、反対半球の電離層を下降透過するホイ斯拉モード伝搬である。

ホイ斯拉モード波の伝搬遅延時間 $t(s)$ は(1)式で示される¹⁾。

$$t = D \cdot f^{-1/2} \quad (1)$$

但し、 $f(Hz)$ はホイ斯拉の周波数であり、 $D(sec^{1/2})$ の値はホイ斯拉の分散値と言う²⁾。

他の1つは、第1図の(2)で示すように電磁波が電離層



第1図 雷放電による電磁波の伝搬路

*電気工学専攻大学院生 (Graduate Student, Electrical Engineering)

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

***電気通信大学 (The University of Electro-Communications)

と大地の間を多重反射しながら伝搬し、周波数に対する時間遅れのない導波管モード伝搬がある。

第2図の周波数-時間スペクトル(以下ソナグラムと記す)で、(1)ホイスラと(2)トウィーク空電を示す。

特に、反対半球で発生した空電は長距離を導波管モードで伝搬するため、導波管の遮断周波数において、数10 ms程度の長い持続時間を持つトウィーク空電が観測されている。

トウィーク空電は、その遮断周波数に応じてモードが存在し、下から1次モード、2次モード、・・・となっている。この現象は、電磁波が空間の全方向に広がって多重反射するとき、お互いに干渉しあうため発生する³⁾。

n 次モードの遮断周波数 f_{nc} は光の速度を c とすれば、電磁波が反射する電離層の高度 h によって定まり、

$$f_{nc} = nc / (2h) \quad (2)$$

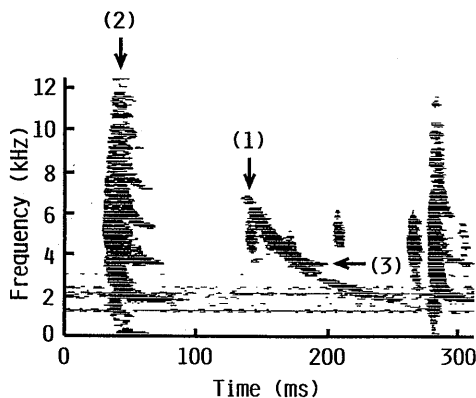
で表される。導波管伝搬による遮断周波数近傍における周波数 f_0 の伝搬遅延時間 t (s)は(3)式で示される⁴⁾。

$$t = (d/c) \times f_0 / (f_0^2 - f_{nc}^2)^{1/2} \quad (3)$$

但し、 d は電磁波の伝搬距離で、 c は光速である。

一般に、低緯度におけるホイスラ波が電離層を下降透過する場合、その透過角度は狭いため、長距離を導波管モードで伝搬しても電磁波の干渉が発生しない。このため世界的に見てもわずか1例⁵⁾のみがその伝搬特性について報告されている。

しかし、我々が中国のWuchang(武漢)において1988年1月5日に行ったVLF帯電磁界3成分のデジタル観測ではほとんどの超低緯度ホイスラで第2図の(3)のようなトウィーク現象が確認された。



第2図 Wuchangにおいて観測されたトウィーク現象が発生したホイスラのソナグラム例

- (1)ホイスラ
- (2)トウィーク空電
- (3)ホイスラのトウィーク現象

そこで、本研究においては電磁界3成分の観測データを解析することにより、ホイスラのトウィーク現象に関して到来方向、偏波特性など細かな伝搬特性を明らかにするものである。

2. 解析方法

1988年1月に観測されたホイスラのトウィーク現象はホイスラと比べ、持続時間が短かく周波数の変化速度が速いため、電磁界3成分を $8 \mu s$ の変換速度でデジタル化し、2048のデータ長でFFT解析を行った。以上の操作により、62.5 Hzの分解能で垂直電界一成分に対する水平磁界二成分の振幅比と位相差を求め⁶⁾、ホイスラのトウィーク現象の伝搬特性を求めた。

次に電磁界解析法によるホイスラの到来方向と偏波パラメータの測定原理について述べる。第3図に示すように観測地点へ入射する到来方向(方位角 θ 及び入射角 i)は(4)式、(5)式で求められる^{6),7)}。

$$\theta = \tan^{-1} (M_{y-z} \sin \phi_{y-z} / M_{x-z} \sin \phi_{x-z}) \quad (4)$$

$$i = \sin^{-1} \{ 1 / (M_{y-z} \cos \phi_{y-z} \cos \theta - M_{x-z} \cos \phi_{x-z} \sin \theta) \} \quad (5)$$

但し、 M_{x-z} 、 M_{y-z} と ϕ_{x-z} 、 ϕ_{y-z} はそれぞれ垂直アンテナに誘起される垂直電界成分に対する東西、南北ループアンテナに誘起される水平磁界成分の振幅比と位相差である。

入射波は第3図のように、TM波成分(入射面に垂直な磁界成分を持つ)とTE波成分(入射面に水平な磁界成分を持つ)に分解でき、入射波の偏波は入射面内に磁界成分 $H_{\parallel}$ と入射面に垂直な磁界成分 $H_{\perp}$ との比として(6)式のように定義する。

$$P = H_{\parallel} / H_{\perp} = u - jv \quad (6)$$

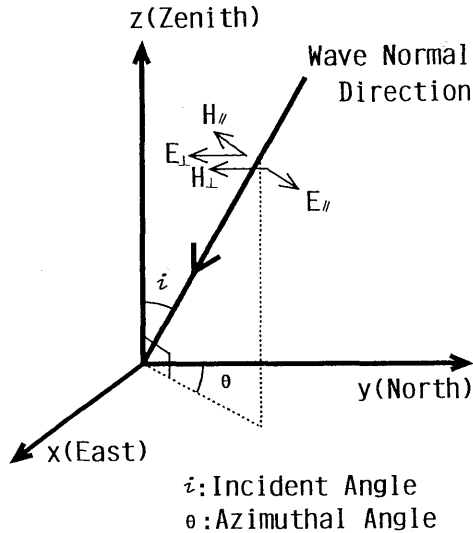
偏波パラメータ(u, v)は(7)式、(8)式にて求まる。

$$u = -(M_{x-z} \cos \phi_{x-z} \sin i + \sin \theta) / \cos i \cos \theta \quad (7)$$

$$v = M_{x-z} \sin \phi_{x-z} \sin i / \cos i \cos \theta \quad (8)$$

この電磁界解析法で求められるホイスラの到来方向(θ, i)はホイスラの電離層下降透過点を示すものであるが、観測地点と電離層下降透過点が離れている遠距離伝搬の場合は電離層における多重反射の最終反射点をも同時に示すことになる。

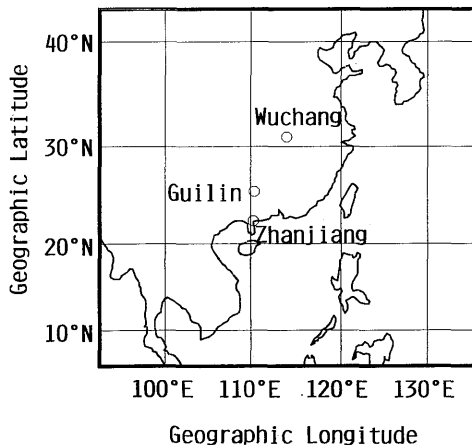
よって、(θ, i)で示される方向が電離層下降透過点であるか、電離層における最終反射点であるかは、入射角度の分布、偏波パラメータ、直交ループアンテナに誘起する水平磁界二成分の位相差から推定できる⁸⁾。



第3図 方向測定を示す座標系と入射楕円偏波のTM, TE波成分への分解

3. データについて

1988年1月5日～1月11日までの7日間, 中国の超低緯度領域を含む第4図で示す3観測地点Zhanjiang (湛江: 地磁気緯度 10.0°N), Guilin (桂林: 同 14.1°N), Wuchang (武漢: 同 19.4°N)において毎日地方時00時00分より04時00分に至る夜間ホイスラの多点同時観測が行われた^{9), 10)}.



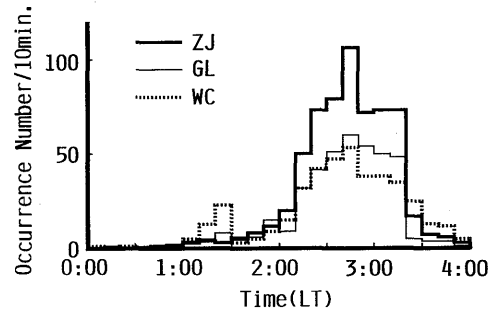
第4図 中国におけるホイスラの多点同時観測地点

1月5日に観測された夜間ホイスラはZhanjiangの上空に電離層下降透過地点が存在することはすでに報告されている¹⁰⁾. Zhanjiang上空で電離層を下降透過したホイスラが約1000km離れたWuchangへ導波管伝搬モードで伝搬しておりデジタルソナグラムの解析によりホイ

スラにもトウィーク現象が確認できた。よって、ここでは最も長距離伝搬したことが既に確認されている1月5日のWuchangで観測されたホイスラについてのみ検討を行う。

なお, 観測期間中ホイスラの発生頻度がピークになったのは, 第5図で示すように, 02時40分前後であった¹¹⁾。

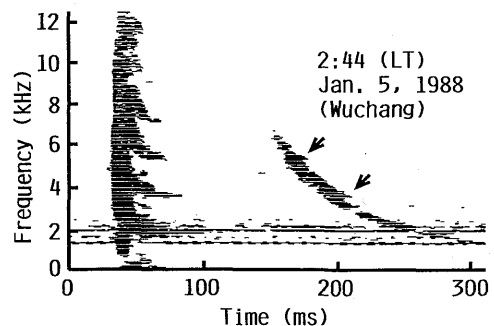
我々はこの1月5日の02:30～03:20までのホイスラ観測データを用いてホイスラのトウィーク現象について解析を行った。



第5図 3観測地点におけるホイスラの発生頻度 (1月5日)

4. 解析結果

第6図は1月5日02時44分にWuchangにおいて観測された代表的なホイスラのソナグラムである。このソナグラムはデジタルテープから $8\mu\text{s}$ の変換速度でサンプリングし, データ長2048でFFT計算した結果をマイクロコンピュータのカラーモニタで(f - t)表示させたものである。



第6図 Wuchangで2時44分に観測されたホイスラのソナグラム

この図からトウィーク空電の1次モードの遮断周波数 f_{c1} は約 1.75kHz である。トウィーク空電は, 1次モードから4次モードまでが確認できるが, ホイスラのト

ウィーク現象については、伝搬距離がトウィーク空電に比べ短く、信号も弱いいため、2次モード及び3次モード(図中の矢印)のトウィーク現象しか確認できない。

トウィーク空電の1次モードの解析¹²⁾は以前に行われており、偏波パラメータ(u,v)は第10図のように(0, -1)であり、左廻りの円偏波で到来していることを意味している。詳しくは文献12)を参照されたい。

一方ホイスラの1次モードは、ノイズによりトウィーク現象がはっきりと確認できないため、2次モードを解析した。また、ホイスラのトウィーク現象と比較するため、ホイスラ自体の特性も解析した。

トウィーク現象は各周波数成分について時間をずらした3~4個の点のデータを解析し、ホイスラについては各周波数について最も強度の強い中心部における1個のデータを解析した。

第7図に、到来方位角 θ について示す。(a)はトウィーク現象の到来方位角であり、(b)はホイスラ自体の到来方位角である。(a)(b)共に、200°~210°の方位角を示し、トウィーク現象もホイスラ自体も同方向から到来していることが分かる。またこの角度はWuchangから見てZhanjiangの方位であり、1月5日のホイスラの発生頻度が高い時間帯におけるホイスラは、Zhanjiang上空に下降透過地点が存在すると言う従来の解析結果とも一致している^{10),11)}。

第8図に偏波パラメータ(u,v)の特性を示す。(a)はホイスラのトウィーク現象における偏波パラメータ、(b)はホイスラ自体の偏波パラメータである。(a)トウィーク現象の(u,v)は、多少のばらつきがあるものの(0, -1)となっている。これはトウィーク空電の(u,v)と同様な特性であり¹²⁾、ホイスラのトウィーク現象も左廻りの円偏波または極めて円偏波に近い楕円偏波で伝搬していることが分かる。

トウィーク現象の(u,v)が多少ばらつくのは、トウィーク空電¹²⁾に比べて、電磁波の到来強度が弱い上に、導波管モードで伝搬してくる距離も約 $\frac{1}{3}$ 以下と短く解析に用いるデータ数が少ないためと考えられる。

一方(b)に示すホイスラ自体の(u,v)は、完全にばらついており、右廻り円偏波で電離層を下降透過したホイスラ¹⁰⁾は長距離を伝搬する間に楕円偏波から直線偏波へと移りつつ伝搬していることが推定できる¹³⁾。

これらのことからホイスラのトウィーク現象は、Zhanjiangにおいてホイスラ波が電離層を下降透過して、Wuchangまでの約1000kmを導波管モードで伝搬した電磁波が干渉し、生成されたものと推定できる。

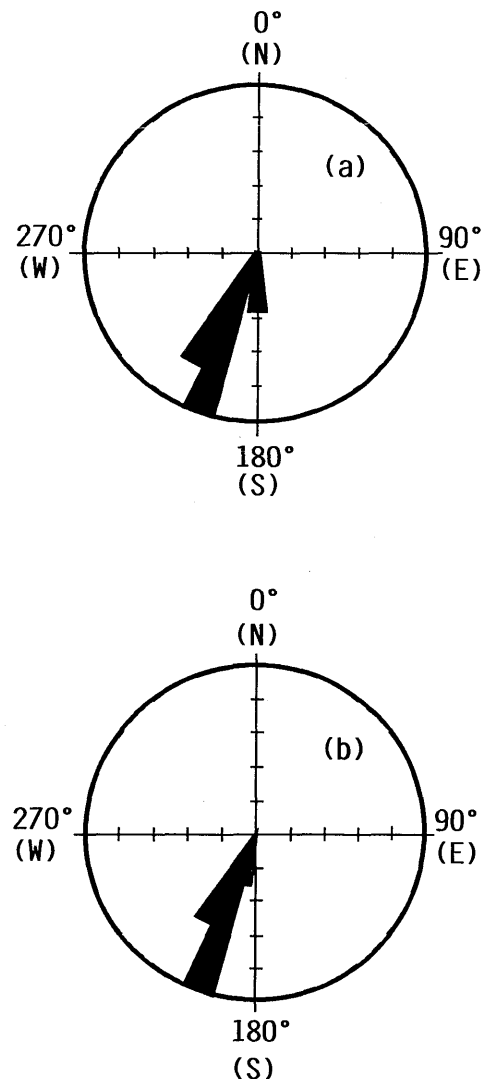
第9図に、Wuchangの観測地点に到達したホイスラのトウィーク現象とホイスラ自体の電離層における最終反射点を示す。但し円の中央はWuchangにおける観測

地点の上空100kmを示す。

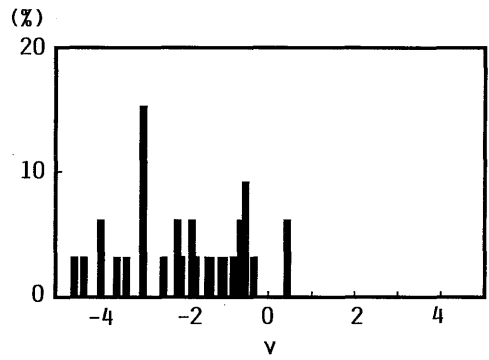
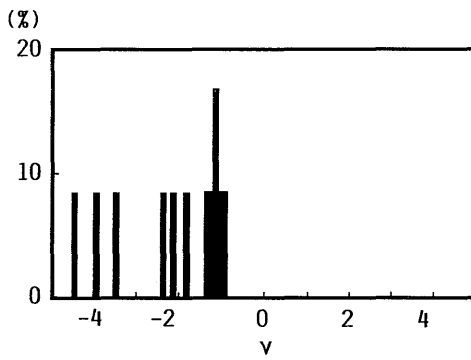
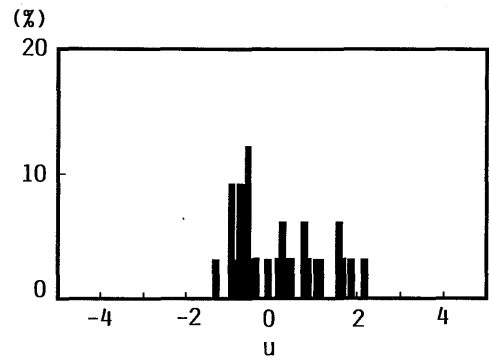
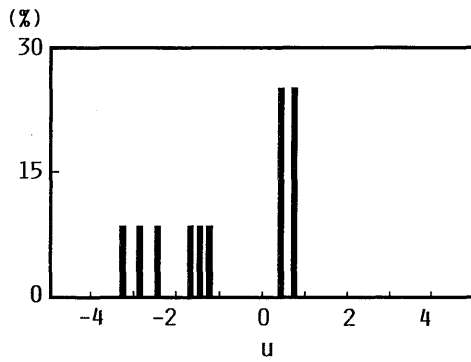
(a)はホイスラのトウィーク現象における最終反射地点、(b)はホイスラ自体の最終反射地点である。

(a)トウィーク現象の最終反射地点は、周波数が低くなるにつれて、観測地点に近づき(入射角が小さくなる)、遮断周波数 $f_{zc}=3.5\text{kHz}$ の時は入射角 $i=0^\circ$ となりトウィーク空電と同一の伝搬特性¹²⁾を示している。

(b)ホイスラ自体では、最終反射地点の周波数依存性はなく、観測地点から半径100km以内の位置にある。

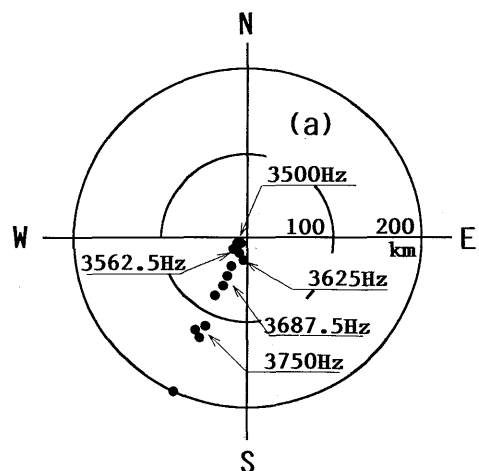
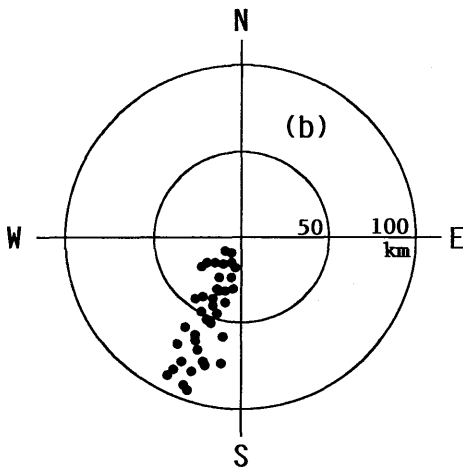


第7図 (a)ホイスラのトウィーク現象と (b)ホイスラ自体の到来方位角

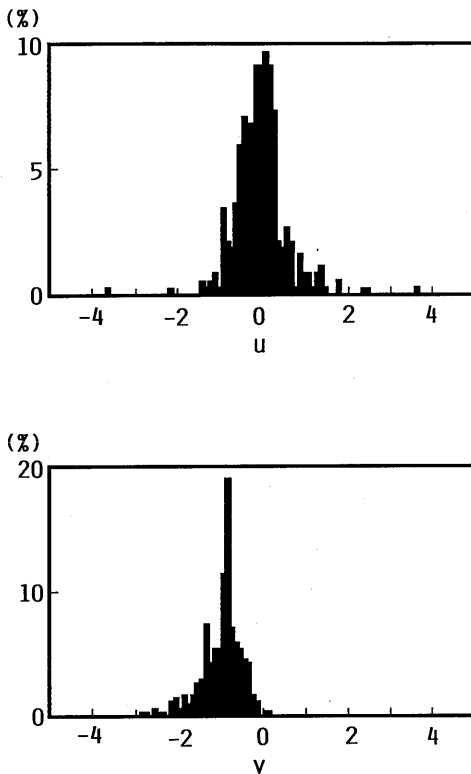


第 8 図 (a) ホイスラのトウィーク現象の偏波パラメータ (u, v)

第 8 図 (b) ホイスラ自体の偏波パラメータ (u, v)



第 9 図 高度100kmにおける電磁波の反射地点
(a) ホイスラのトウィーク現象
(b) ホイスラ自体



第10図 トウィーク空電の偏波パラメータ(u, v)

5. むすび

表1にホイスラのトウィーク現象の周波数に対する入射角 i 、方位角 θ 、偏波パラメータ(u, v)を記す。

ホイスラのトウィーク現象は、到来方位角 θ 以外はすべて周波数依存性があり、遮断周波数($f_{2c}=3.500\text{kHz}$)に近づくにつれ、天頂から入射し、左廻りの円偏波に近づくことが分かる。

表1 トウィーク現象の周波数特性($f_{2c}=3.500\text{kHz}$)

Fq [MHz]	i [deg]	θ [deg]	u	v
3.7500	50.2	205.9	-3.94	-8.75
3.6875	31.1	203.0	-3.00	-4.24
3.6250	17.0	184.5	-1.47	-2.12
3.5625	9.7	204.0	0.49	-1.16
3.5000	5.4	202.7	0.72	-1.15

電離層上部は、自由空間中に比べ屈折率が大きいため($n \approx 100$)、電離層上部ではホイスラ波の透過可能な円錐角度は電離層に対しほぼ垂直である。これをTransmission Coneと言う²⁾。

地球の磁力線に沿っているダクト中を伝搬するホイス

ラ波は、ダクト内の最大電子密度 N_m と周辺の電子密度 N_b の比 N_m/N_b によって決まる範囲で捕捉され伝搬する。この捕捉される円錐角度をTrapping Coneと言う。

図11-(a)のように、2つのConeが重なっている割合で、電離層を透過したホイスラ波の自由空間中への広がり方が決まる。

ホイスラ波が捕捉されているダクトは地球の磁力線に沿っているため、低緯度になるにつれてTransmission ConeとTrapping Coneとのなす角が大きくなり、2つのConeの重なり部分が少なくなる。このため超低緯度においては図11-(b)のように重なる部分がなく、ホイスラは観測されない。

しかし、我々が観測した1月のほとんどのデータにはホイスラが存在した。更に、1月5日のWuchangで観測されたホイスラには多重反射による電磁波の干渉によるトウィーク現象が現れた。

これはTransmission ConeとTrapping Coneの重なり部分が何らかの原因で大きくなり、ホイスラ波が電離層を透過した際広い角度で空間に広がっていたためだと考えられる。

この原因を考察してみると

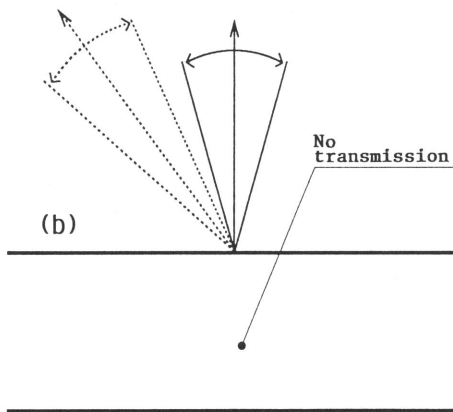
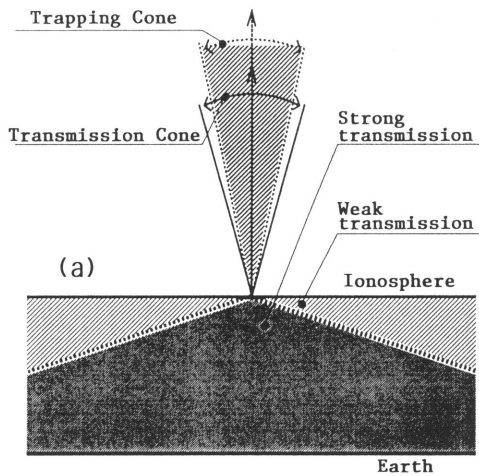
(1) ダクトの内側と外側における電子密度の比が大きくなり、図11-(c)のように、Trapping Coneが大きくなり、Transmission Coneとの重なりが大きくなった

(2) 図11-(d)のように、赤道異常などにより電離圏での電子密度が変化して電離層の高さが高緯度に比べ低緯度の方が低くなったとすると、電離層が傾くためTransmission Coneも傾き、2つのConeの重なりが大きくなった

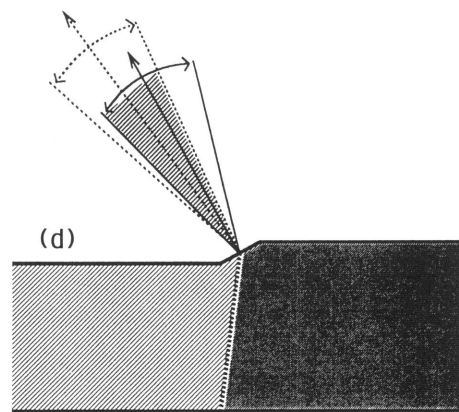
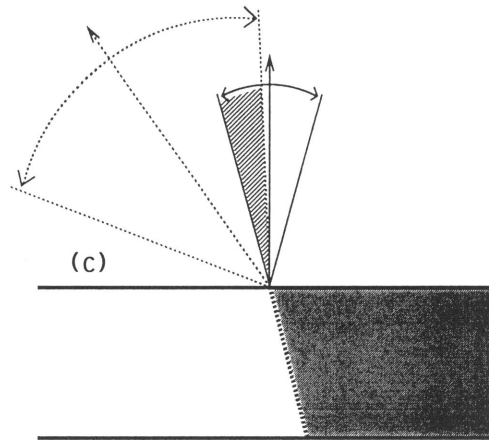
(3) (1)、(2)の2つとも起こった場合

などが考えられる。

しかし、Wuchangにおけるホイスラの入射角は大きな角度を示しておらず(1)、(2)で推定した自由空間中でのホイスラ波の広がり方とは必ずしも一致していない。これらはホイスラの到来方向測定法に問題があるのか、それとも我々が推定する伝搬とは異なる伝搬形態が存在するのか興味深い現象である。今後さらに研究を行いたい。



第11図 電離層状態(1)



第11図 電離層状態(2)

謝 辞

本研究は本学における特別研究費の御助成によるものであり、御支援頂いた関係各位に感謝する。また、御指導頂いた電子工学科三上 修教授に深謝する。

参 考 文 献

- (1) L.R.O. Storey: "An investigation of whistling atmospherics" Phil. Trans. Roy. Soc. London, **A246**, pp.113-141 (1953).
- (2) R.A. Helliwell: "Whistlers and Related Ionospheric Phenomena", pp.190-201, Stanford Univ. Press, CA (1965).
- (3) 島倉 信: "磁気圏ホイッスラ波の信号解析および電離層透過域推定に関する研究", 名古屋大学工学部学位論文, p90 (1987).
- (4) Wait, J.R., Electromagnetic waves in stratified media, 2nd ed., Pergamon Press, (1970).
- (5) 島倉 信, 椿 昭浩, 早川正士, 鈴木弘喜: "導波管効果をもつ特異なホイッスラ波の電離層透過点推定と発生機構", 電子通信学会アンテナ・伝搬研究会資料, **A・P86-130**, pp.19-24 (1987).
- (6) 太田健次: "ホイッスラ到来方位の自動観測", 信学論(B), **J67-B**, 8, pp.869-876 (1984).
- (7) 太田健次, 早川正士, 馬場清英, 江口博之: "低緯度ホイッスラにおける到来方向の周波数依存性", Res. Lett. Atmos. Electr., 9, pp. 43-52 (1989).
- (8) 高橋 修, 太田健次, 場清英, 江口博之, 早川正士: "高緯度におけるホイッスラの電離層下降透過点", 中部大学工学部紀要, 27, pp. 49-59 (1991).
- (9) Hayakawa M., Ohta K., Shimakura S., J.S.Xu, Z.T.Bao and B. X.Liang: "A Proposal for multi-stationed direction finding measurements of Low-and equatorial-latitude whistlers in China", Research letters on Atmospheric Electricity, vol.8, pp.31-35 (1988).
- (10) 太田健次, 早川正士, 島倉 信, 江口博之: "中国超低緯度における夜間ホイッスラの多点同時観測による到来方向測定", 信学論(B-II), **J73-B-II**, 4, pp.182-189 (1990).
- (11) Hayakawa M., Ohta K. and Shimakura S.: "Spaced direction

- finding of nighttime whistlers at low and equatorial latitudes and their propagation mechanism", J.Geophys. Res., **95**, pp. 15091-15102 (1990).
- (12) 馬場清英, 太田健次, 友松 通, 早川正士: "トウィーク空電の波動特性の周波数依存性", 信学論(B-II), **J74-B-II**, 11, pp. 587-593 (1991).
- (13) 長野 勇, 満保正喜: "フルウェーブ解析法による各種VLA方向探知の偏波誤差評価", 信学論(B), **J72-B-II**, 2, pp.72-80 (1989).