

超低緯度におけるホイスラの到来方向測定

友松 通*, 太田 健次**, 早川 正士***,
島倉 信****, 江口 博之**

Direction Finding of Whistlers at Very Low Latitudes

Tooru TOMOMATSU*, Kenji Ota**, Masashi HAYAKAWA***,
Shin SHIMAKURA****, and Hiroyuki EGUCHI**

(Received March 31, 1989)

Simultaneous direction finding measurements of very low latitude whistlers have been performed in January 1988 at three stations in China; Zhanjiang (geomag. lat. 10.0°N), Guilin (14.1°N), and Wuchang (19.4°N). The preliminary analyses for a particular day (January 5) of the highest occurring number of whistlers have been presented. On this day, there was a single dispersion value ($D = 10.5 \text{ sec}^{1/2}$) for night-time whistlers at the three stations, and their ionospheric exit points were located just in the zenith of Zhanjiang with approximately a right-handed circular polarization. This direction finding of whistlers lends strong evidence to our previous implication about low- and middle-latitude stations. This implies that the propagation of whistlers even at equatorial-latitudes is attributed to ducted propagation and there is a preferred propagation channel even at a geomagnetic latitude of around 10° .

1. まえがき

以前, 早川と田中は地磁気緯度が 20° 以下の地域におけるホイスラはダクト捕捉条件及び地上への電離層下降透過条件で極めて伝搬に不都合な状態であることを示し, 地磁気緯度 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ におけるホイスラの伝搬特性と 20° 以下の超低緯度における特性とは非常に異なったものであることを明かにした¹⁾. そして, これらの伝搬メカニズムは十分解析されていないことを示し, その研究の重要性を強調した. 最近, これら超低緯度ホイスラにおけるいくつかの重要な研究が恩藤, Andrews, Liang, Thomson らによってなされた. しかしながら, 彼らの結

論はときとして相反するものとなった. 恩藤らによる沖縄 (地磁気緯度 15.3°N) における観測では, エコートレーンホイスラに注目し沖縄で観測されるホイスラはダクト伝搬であるとの結論を導き出し, 多点同時観測で検出されたホイスラの下限地磁気緯度が石垣島の 12.9°N であることから, これより低緯度の赤道域においてはホイスラが観測されないものとした²⁾. しかしながら, Liang らによって地磁気緯度が 5.5°N のような赤道域の超低緯度においても夜間ホイスラの地上観測がなされた³⁾. また, 多点同時観測とレイトレースによる理論解析より, 地磁気緯度 10° 近傍にノンダクト伝搬となりうる好条件の伝搬路が存在することを示し, ノンダクト伝搬であるとの結論を導き出した. このような地磁気緯度が 10° 近傍における, ノンダクト伝搬路の存在は Andrews と Thomson の計算機によるレイトレースによっても支持された^{4), 5)}. そこで, 本研究はこの相反を解決するために行なったものである.

*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, Nagoya University)

****千葉大学 (Department of Electrical and Electronic Engineering, Chiba University)

赤道域におけるホイスラ伝搬と電離層、及びプラズマ領域のメカニズムを詳しく解明するために、ホイスラの電離層下降透過点を特定することは不可欠な要素である。よって、超低緯度におけるホイスラの伝搬メカニズム、及び赤道域における電離層のプラズマ構造のより詳しい理解を得るため名古屋大学空電研究所と中国武漢大学空間物理系の共同研究として、1988年1月5日より1月11日まで中国における地磁気緯度 $10^{\circ}\text{N} \sim 20^{\circ}\text{N}$ の範囲を網羅する三観測地点、Zhanjiang (地磁気緯度 10.0°N)、Guilin (同 14.1°N)、Wuchang (同 19.4°N) において毎日 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を実行した。この観測期間において電磁界解析法を用いた広周波数帯域に亘るホイスラの到来方向と偏波パラメータの測定を行なった。その一例として1月5日の解析結果では、三観測地点における夜間ホイスラは同一分散値 ($10.5 \text{ sec}^{1/2}$) であり、Zhanjiang のほぼ真上に安定したダクト伝搬路が存在し、右旋性円偏波で電離層を下降透過した後、電離層と大地間の多重反射により約 500 km 離れた Guilin へは右旋性及び左旋性楕円偏波となって伝搬し、約 1000 km 離れた Wuchang へは直線偏波となって伝搬していることが明らかとなった。従来、我々が行なった低緯度より中緯度間 (地磁気緯度 $20^{\circ}\text{N} \sim 35^{\circ}\text{N}$) の観測において得られた結論であるダクト伝搬路の生成が地磁気緯度 10°N 付近の赤道域においても存在することを直接的に証明した。この観測目的とその実行計画については一部すでに報告されている⁶⁾。ここではこの観測から得られた予備解析の一部より二三の興味ある解析結果についてのみ報告する。

2. ホイスラ到来方向測定とその解析方法

VLF 波到来方向測定の観測においては従来より異なる解析システムがある。

一つは直交ループアンテナによるゴニオメータ法で到来波の方位角を求めるものである⁷⁾。

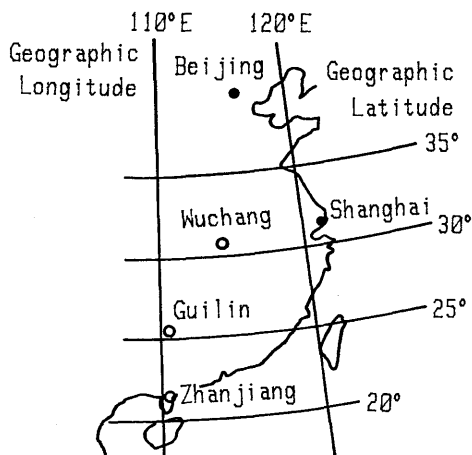
次に三観測地点への伝搬波の時間差を測定し、方位角と入射角を求める時間差測定法によるものである⁸⁾。これらは何れも多点同時観測による方式である。

他の一つは、直交ループアンテナと垂直アンテナに誘起する水平磁界二成分と垂直電界一成分より方位角と入射角を一観測地点において求める電磁界解析法である^{9), 10), 11)}。以前の電磁界解析法においては一般にアナログ信号処理を用いていたため、特定な狭周波数帯域における解析のみが可能であった。しかしながら、最近三電磁界成分の広周波数帯域でのデジタル解析に二つの方式が用いられるようになってきた。その一つは入射波の波面の偏波と到来方向を FFT で求めるものであり¹²⁾、他の一つは電離層を下降透過するホイスラ波のエネルギー分布を

波動関数により求めるものである¹³⁾。

我々が従来より用いている直交ループアンテナと垂直アンテナに誘起する水平磁界二成分と垂直電界一成分の振幅比と位相差よりホイスラの到来方向を一観測地点において求める電磁界解析法は、観測地点の近傍にホイスラの電離層下降透過点が存在する場合は多数のホイスラを解析するのに極めて有効である。しかし、観測地点とホイスラの電離層下降透過点が離れ、電離層及び大地間の多重反射のファクタを考慮しなければならないときにはその電離層下降透過点を正確に求めることは困難である。また、観測地点に到来するホイスラ波が直線偏波と見なされるほどの長距離伝搬をした場合はゴニオメータ法が有効であることは従来の解析結果でも明かである⁷⁾。

本解析においてはこれらの解析手法を用いて到来方向及び偏波特性を明らかにする。



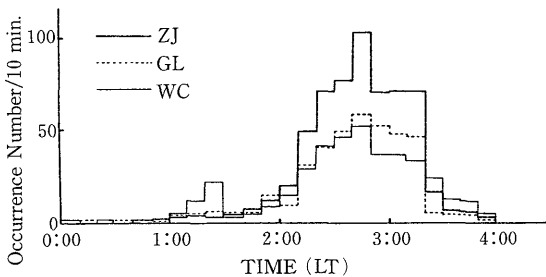
第1図 中国におけるホイスラの多点同時観測地点

ホイスラ到来方向の測定は第1図に示す中国における Zhanjiang (地理緯度 21.2°N , 地理経度 110.4°E), Guilin (同 25.3°N , 110.2°E), Wuchang (同 30.5°N , 114.6°E) の三観測地点において1988年1月5日より11日までの期間、毎日地方時 00 時 00 分より 04 時 00 分までの4時間行なわれた。この時間帯の選定は Liang らが行なった超低緯度におけるホイスラの発生頻度特性によるものである³⁾。直交ループアンテナ ($S=80 \text{ m}^2$, $L_a=256 \mu\text{H}$, $r_a=1 \Omega$) と垂直アンテナ (高さ 10 m, $C_a=120 \text{ pF}$) に誘起する水平磁界二成分と垂直電界一成分の三電磁界成分を広周波数帯域 ($0 \sim 20 \text{ kHz}$) に亘りデジタルレコーダを用いて記録した。デジタルレコーダによって記録されたデータは後に再生され解析される。再生された三成分の出力は $40 \mu\text{s}$ 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 のデータ長でマイクロコンピュータによる FFT 解析を行なう。以上の操作により、25 Hz の分解能で垂直電界成分に対する二水平磁界成分間の振幅比と位相差が求められる¹²⁾。これらの振幅比と位相差はホイスラの周波数が時間に対し非定常波であるため±150 Hz の帯域で平均化し、電磁界解析法とゴニオメータ法よりホイスラの到来方向と偏波パラメータが計算される。これらの解析手法で求めた結果は、三成分の出力を 2.5 μs の高速 A/D コンバータでデジタル化し、1024 のデータ長で求めた分解能 200 Hz の解析結果とも良く一致していることが確認されている。ホイスラは周波数を f (Hz)，伝搬時間を t (sec)，分散値を D ($\text{sec}^{1/2}$) とすれば $f = (D/t)^2$ の関係式で時間的に変調された信号波であると考えられる。よって、25 Hz の狭周波数帯域フィルタを用いて中心周波数を $f = (D/t)^2$ の関係式でホイスラの周波数が変動するに従い移動させる。このデジタルレコーダと FFT 解析の手法により周波数トラッキングが実現され、従来行なわれていたアナログ方式の電磁界解析法やゴニオメータ法とは異なる細かな周波数解析が可能となった。

3. 二三の予備解析結果

観測は予定通り実行され、この観測期間において検出されたホイスラの解析が行なわれた。ここではこの観測期間の内、最もホイスラの発生頻度が高く S/N の良好なホイスラが検出された 1988 年 1 月 5 日の例に限って報告することにする。



第2図 三観測地点におけるホイスラの発生頻度

第2図は1月5日における三観測地点でのホイスラ発生頻度の時間変化を示す。最も発生頻度が高いのは3時前後であり、これは以前 Liang らが行なった観測結果とも良く一致している³⁾。この図において3時前後の Zhanjiang におけるホイスラの発生頻度は他の観測地点 Guilin, Wuchang のそれよりも明かに高い。各観測地点における雑音レベルは必ずしも同一ではなく、このような赤道域を含む低緯度においては緯度が低いほど空

電雑音が高く一概に発生頻度のみで伝搬状態を比較することは困難である。しかしながら、02時30分より02時50分までは各観測地点の発生頻度が最も高く十分な比較が行えるものと考えられる。

Zhanjiang におけるホイスラの発生頻度は他の観測地点のそれよりも高くなることは以前 Liang らによって行なわれた観測結果と同一傾向を示すものである³⁾。また、さらに重要なことは Zhanjiang において、この4時間の観測時間におけるホイスラの分散値は $10.5 \text{ sec}^{1/2}$ の単一分散値であることである。これは赤道域におけるホイスラの一特性である。第3図に最も発生頻度の高い3時台に同時観測された分散値 $10.5 \text{ sec}^{1/2}$ のホイスラの周波数スペクトル例を示す。Hx は南北に展張されたループアンテナに誘起する水平磁界成分であり、Ez はバーティカルアンテナに誘起する垂直電界成分を示す。到来するホイスラの強度は周波数スペクトル上の濃淡で示されており、3時台において Zhanjiang は他の観測地点に比べ Hx が最も強く受信されていることが明かである。

一方 Wuchang においては、第2図のホイスラ発生頻度で第一ピークが 01時10分より01時30分の時間帯に存在する。しかしながら、Zhanjiang と Guilin においてはほとんどこのピークは観測されていない。この発生頻度のピークをなす一群のホイスラは分散値が $12.0 \text{ sec}^{1/2}$ であり明かに3時台にピークを持つ分散値 $10.5 \text{ sec}^{1/2}$ のホイスラ群とは異なった伝搬路を持つことが推定される。

3時台にピークを示すホイスラについて伝搬特性の解析を行なった。岡田らによって用いられた(1)、(2)式で与えられる偏波パラメータ u , v を用いてホイスラの偏波特性を求めた¹⁰⁾。

$$u = -(M_{x-z} \cos \phi_{x-z} \sin i + \sin \theta) / (\cos i \cos \theta) \quad (1)$$

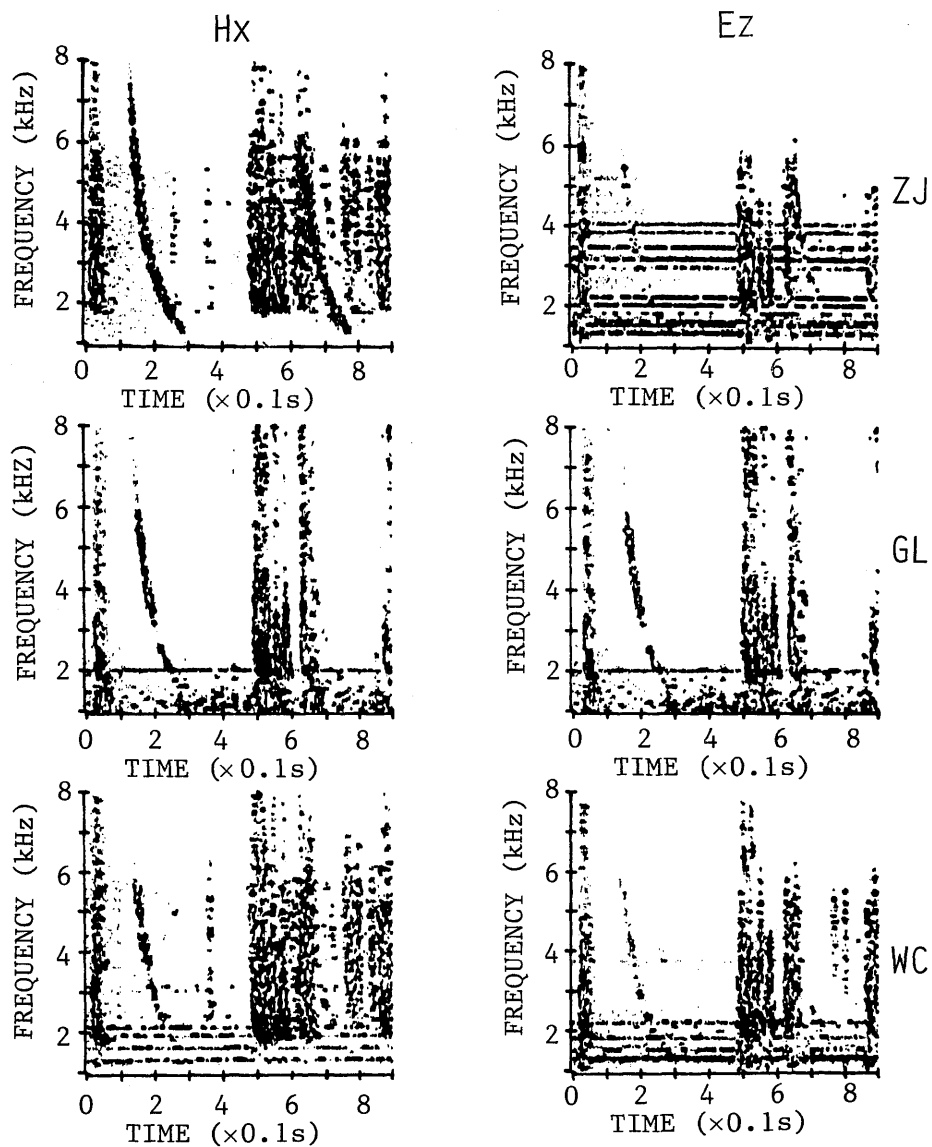
$$v = (M_{x-z} \sin \phi_{x-z} \sin i) / (\cos i \cos \theta) \quad (2)$$

但し、ホイスラの到来する入射角を i ，方位角を θ とし、入射面内の磁界成分を $H_{\parallel}$ ，入射面に直交する磁界成分を $H_{\perp}$ とすれば、偏波パラメータ P は(3)式で定義される。

$$P = H_{\parallel} / H_{\perp} = u - jv \quad (3)$$

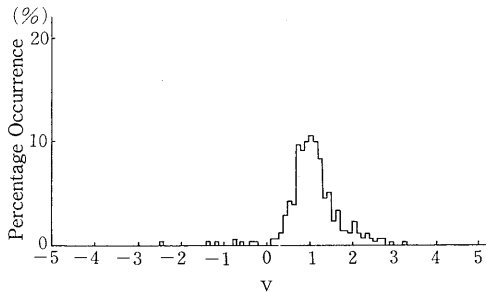
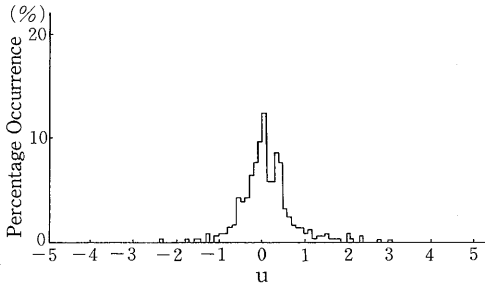
また、 M_{x-z} と ϕ_{x-z} はそれぞれバーティカルアンテナに誘起する垂直電界成分に対する東西ループアンテナに誘起する水平磁界成分の振幅比と位相差である。

この偏波パラメータは $u = 0, v = 1$ によって右旋性円

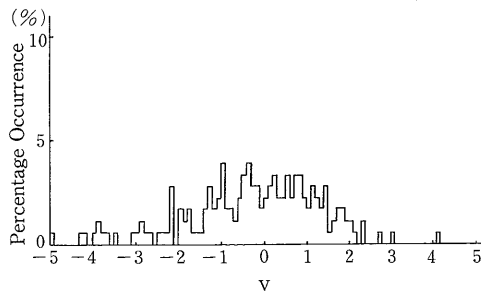
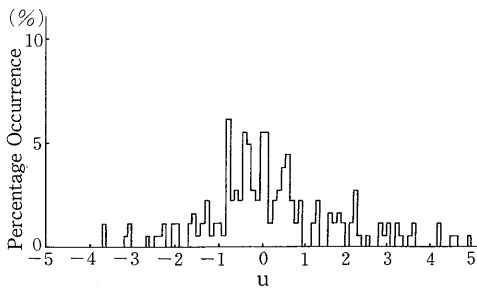


第 3 図 三観測地点で同時観測されたホイストラの H x、
E z 成分の周波数スペクトル

偏波が, $u=0$, $v=0$ によって垂直直線偏波が定義される。単一ホイスラの各周波数における偏波特性については一部すでに報告してある¹⁴⁾。ここでは, 最もホイスラの発生頻度が高い 02 時 30 分より 02 時 50 分における S/N の良好なホイスラ 5 個を選び偏波特性を求めた。

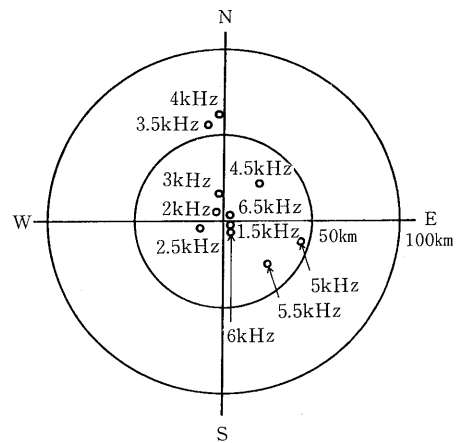


第 4 図(a) Zhanjiangにおける偏波パラメータ



第 4 図(b) Wuchangにおける偏波パラメータ

第 4 図(a)は Zhanjiang であり, (b)は Wuchang におけるホイスラの偏波パラメータ u, v を示す。観測されたホイスラは Zhanjiang においては統計的に $u=0$, $v=1$ に中心がありほぼ右旋性円偏波で到来していることが明かであり, Wuchang においては $u=0$, $v=0$ に中心があり直線偏波で観測地点に伝搬したものと考えられる。また Guilin においては右旋性及び左旋性の楕円偏波となった(図は省略する)。よって Zhanjiang においては電磁界解析法によりホイスラの電離層下降透過点を求め, Wuchang 及び, Guilin においてはゴニオメータ法によりホイスラの到来方位を求めた。解析された全てのホイスラにおいて同一解析結果となっていることより以下に示す 02 時 42 分に同時観測されたホイスラの一例で示す。電磁界解析法による広周波数帯域に亘るホイスラの到来方位の測定は, 太田らによって用いられている¹²⁾。この方式により Zhanjiang で求められた 6.5 kHz より 1.5 kHz までの 500 Hz 間隔におけるホイスラの電離層下降透過点を第 5 図に示す。但し, 電離層の高さを 100 km と仮定してある。

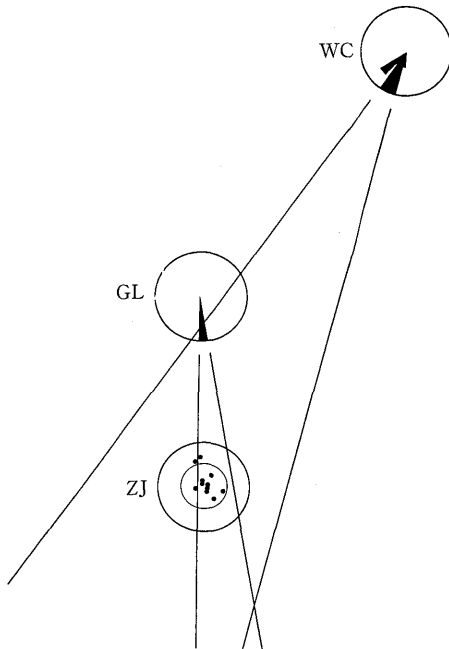


第 5 図 Zhanjiang において電磁界解析法で求められたホイスラの電離層下降透過点

第 5 図より, このホイスラの電離層下降透過点は半径 50 km 以内の極めて狭い範囲に集中しており, 周波数の依存性がないことが分かる。よって, Zhanjiang で観測されたホイスラは観測地点のほぼ真上に電離層下降透過点の存在することが明かである。

次に Wuchang と Guilin においてこのホイスラの到来方位をゴニオメータ法により求めた例を第 6 図に示す。スリットは, 6.5 kHz より 1.5 kHz までの 500 Hz 間隔におけるホイスラの到来方位を 10° 単位で求め, その発生頻度の大きさを円の半径で正規化表示したもので

ある。ビーム状のスリットは最も発生頻度が高い角度を示している。第6図よりホイスラの到来方位は明かに Zhanjiang を示しており、ごく僅かな到来方位の違いのみが存在している。よって、Wuchang と Guilin において観測されたホイスラは明かに Zhanjiang の方向より到来している。以上の解析結果より、3 時前後にピークを持つホイスラ群は Zhanjiang のほぼ真上に電離層下降透過点を持ち円偏波で電離層を垂直透過し、電離層と大地間の多重反射により Guilin においては楕円偏波となって伝搬し、さらに、伝搬距離の長い Wuchang へは



第6図 GuilinとWuchangにおいてゴニオメータ法で求められたホイスラの到来方位

直線偏波となって伝搬したものと考えられる。

これらの解析結果は第3図のホイスラ周波数スペクトルの濃淡からも推定される。つまり、ループアンテナで検出されるホイスラの水平磁界成分 H_x は Zhanjiang が最も強く、Guilin, Wuchang の順に次第に弱く検出されている。一方、パーティカルアンテナで検出される垂直電界成分 E_z は、Guilin が最も強く、Wuchang, Zhanjiang の順に弱くなっている。このことより、 H_x が最も強く、 E_z が最も弱く受信された Zhanjiang はその極めて近傍に電離層下降透過点が存在し、Zhanjiang より Guilin, Wuchang へと伝搬していることが推定される。

これらの予備観測結果は地磁気緯度 10° の Zhanjiang 付近におけるホイスラが電離層を下降透過する状態を直接的に示したものであり、このような超低緯度において

も安定した伝搬路が存在することを明らかにしたものである。またこのことは以前 Liang によって行なわれた多点同時観測の結果を強く支持するものである。

第2図に示されるホイスラの発生頻度において、Wuchang での第一ピークは、Guilin, Zhanjiang ではほとんど観測されていない。このことから、他の観測地点に比較し、Wuchang 側への伝搬が好条件となる地点に下降透過しているものと推定される。この発生頻度のピークにある一群のホイスラは分散値が $12.0 \text{ sec}^{1/2}$ である。また、Wuchang におけるこれらのホイスラの偏波特性は楕円偏波であり、ゴニオメータ法により求めたホイスラの到来方位はほぼ Wuchang の南北子午面上にある。よって、これらのホイスラは Zhanjiang より高緯度側に電離層下降透過点が存在するものと考えられる。つまり、電離層下降透過点より高緯度側にある Wuchang へは強く伝搬し、この地点の磁気子午面に対し垂直方向または下方向となる Guilin と Zhanjiang へは高緯度側と比較し強くは伝搬できないものと考えられる。このような高緯度側へのより強い伝搬はホイスラのダクト伝搬を証明するものである。

4. むすび

赤道域におけるホイスラの伝搬と電離層及びプラズマ領域のメカニズムを詳しく解明するために、1988年1月5日より11日まで中国の超低緯度領域を含む三観測地点、Zhanjiang (地磁気緯度 10.0°N), Guilin (同 14.0°N), Wuchang (同 19.4°N) において毎日 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を行なった。広周波数帯域に亘るホイスラの到来方向と偏波パラメータの測定は FFT 解析により求められたホイスラ到来波の垂直電界成分に対する水平磁界成分の振幅比、及び位相差より、電磁界解析法とゴニオメータ法を用いて行なわれた。

観測期間において最も発生頻度の高い1月5日の例では以下に示す観測結果が得られた。

- 1) 地磁気緯度 10°N より 20°N の超低緯度においても1時間ないし2時間程度の安定したホイスラ伝搬路の生成がなされている。
- 2) これらのホイスラは電離層下降透過点の近傍 100 km 以内においては右旋性円偏波であり、500 km 離れた地点においては右旋性及び左旋性楕円偏波となり、1000 km 以上離れた地点へは直線偏波となって伝搬している。
- 3) これらの超低緯度におけるホイスラの伝搬はダクト伝搬によるものであり、ホイスラ発生頻度の変動はダクトの生成と消滅によるもので、01 時~03 時にピークを持つ超低緯度におけるホイスラの発生はダク

トに捕捉されるのに極めて好条件の伝搬メカニズムが生成されるためと推定される。

- 4) 従来、我々が行った低緯度より中緯度間 (20°N ~ 35°N) の観測において得られた結論であるダクト伝搬路の生成が地磁気緯度 10°N 付近の赤道域においても存在することを直接的に証明した。

超低緯度及び赤道域におけるホイ斯拉の伝搬特性はまだ未解決な部分が存在する中低緯度及び高緯度におけるホイ斯拉伝搬の基本的な部分と密接な関係がある。そして、この超低緯度におけるホイ斯拉観測は一般的なホイ斯拉伝搬の研究に貢献する極めて重要なものと考えられるのでさらに細かな解析が必要となろう。

5. 謝 辞

本研究のデータ解析は本学の特別研究費の御援助によるものであり、大学当局に厚く感謝すると共に、常に御支援を頂く電子工学科三上 修教授に深謝する。観測結果について有意義な御助言を頂いた西脇 彰助教授、馬場清英講師に感謝する。又、中国における観測に当り、格別の便宜を与えて頂いた中国、武漢大学関係各位、特に、B.X.Liang 教授、Z.T.Bao 教授、J.S.Xu 助教授、M.Tian, C.C.Tang 両氏に深謝する。

文 献

- 1) Hayakawa, M. and Y.Tanaka: "On the propagation of low-latitude whistlers", Rev. Geophys. Space Phys., 16, p. 111 1978.
- 2) Ondoh, T., M. Kohtaki, T. Murakami, and S. Watanabe: "Propagation characteristics of low-latitude whistlers", J. Geophys. Res., 84, p. 2097 1979.
- 3) Liang, B. X., Z. T. Bao and J. S. Xu: "Propagation characteristics of nighttime whistlers in the region of equatorial anomaly", J. Atmosph. Terr. Phys., 47, p. 999 1985.
- 4) Andrews, M. K.: "On whistlers with very small dispersion", J. Atmosph. Terr. Phys., 41, p. 231 1979.
- 5) Thomson, N. R.: "Ray-tracing the paths of very low latitude whistler-mode signals", J. Atmosph. Terr. Phys., 49, p. 321 1987.
- 6) Hayakawa, M., K. Ohta, S. Shimakura, J. S. Xu, Z. T. Bao, and B. X. Liang: "A proposal for multi-stationed direction finding measurements of low-latitude whistlers in China", Res. Lett. Atmosph. Electr., 8, p. 31 1988.
- 7) Bullough, K. and J. L. Sagredo: "VLF goniometer observations at Halley Bay, Antarctica - I. The equipment and the measurement of signal bearing", Planet. Space Sci., 21, p. 899 1973.
- 8) Delloe, J. and M. Garnier: "Sur L'emergence des sifflements radio'electriques hors de l'ionosphere", C. R. Acad. Sci., 257, p. 1327 1963.
- 9) Tsuruda, K. and K. Hayashi: "Direction finding technique for elliptically polarized VLF electromagnetic waves and its application to the low latitude whistler", J. Atmosph. Terr. Phys., 37, 1193 1975.
- 10) Okada, T., A. Iwai, and M. Hayakawa: "A new whistler direction finder", J. Atmos. Terr. Phys., 43, 679 1981.
- 11) 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.
- 12) Ohta, K., C. C. Tang, S. Shimakura, and M. Hayakawa: "Wide-band direction finding of low-latitude whistlers by using a FFT analyzer". Proc. 8th Intl. Conf. on Atmosph. Electr., Uppsala, Sweden, 641 1988.
- 13) Shimakura, S. and M. Hayakawa: "On the estimation of wave energy distribution of magnetospheric VLF waves at the ionospheric based with ground-based multiple electromagnetic field components". Proc. Chapman Conf. on Plasma Waves and Instabilities in Magnetospheres and at Comets, Sendai, 238 1987.
- 14) 太田健次, 馬場清英, 早川正士, 江口博之: "低緯度ホイ斯拉における到来方向の周波数依存性", Res. Lett. Atmos. Electr., 9, p. 43 1989.