

3次元レイトラッキングによる超低緯度ホイッスラ

西村 恭弘*, 太田 健次**, 早川 正士***

Three-Dimensional Ray Tracing of
Very Low Latitude Whistlers

Yasuhiro NISHIMURA*, Kenji OTA** and Masashi HAYAKAWA***

(Received May 31, 1995)

Simultaneous measurements made at very low latitudes in South China have already indicated that nighttime whistlers are attributed to ducted propagation. In addition, two-dimensional ray tracing computation also indicated ducted propagation. But the ordinary ducted propagation needs an enhancement factor of more than 100 percent. However, such an enhancement factor has never been observed.

In this paper, three-dimensional ray tracing computation including the latitudinal and longitudinal variations with the IGRF magnetic field line of whistlers at very low latitudes have been made to investigate the possibility of nonducted propagation.

1. まえがき

磁気圏におけるホイッスラ (Whistler) の伝搬には大別して2通りの様式がある⁽¹⁾。その1つは、地磁気力線に沿って周囲電子密度より濃いダクト (Duct) と呼ばれる通路を伝搬するダクト伝搬である。他の1つは、電子密度の異なる層をスネルの法則 (Snell's law) に従って屈折透過しながら反対半球に到達するノンダクト (Non-duct) 伝搬である。我々は1988年1月に第1図で示す中国超低緯度領域の3観測地点 Zhanjiang (地理緯度 21.3°N, 地理経度 110.3°E; 地磁気緯度 10.0°N), Guilin (同 25.3°N, 110.2°E; 14.1°N), Wuchang (同 30.5°N, 114.6°E; 19.4°N) でホイッスラの同時観測を行った⁽²⁾。ここで解析されたホイッスラの伝搬特性より、超低緯度で観測されるホイッスラは

- 1) 単一分散値のホイッスラが安定して観測される。
- 2) エコートレイン (Echo train) ホイッスラが多数観測さ

れ、希にはハイブリッド (Hybrid) ホイッスラも観測される。

- 3) ホイッスラの電離層下降透過点が半径 50km 以内の比較的狭い範囲に集中している。
 - 4) 電離層下降透過点の周波数依存性は見られない。
 - 5) 高緯度側へ強く伝搬する傾向がある。
- などの特性を見いだした⁽²⁾。このため、超低緯度で観測

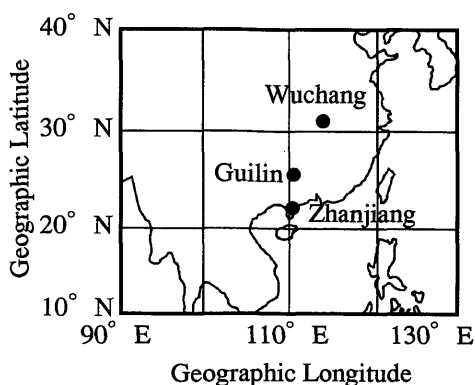


図1 中国における夜間ホイッスラの観測地点

*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)

されるホイスラはダクト伝搬であると言う結論に達した。

また、2次元レイトレーシング(Ray tracing)プログラムを用い、広周波数帯域でのノンダクト伝搬の理論計算を行った。その結果、以下の特性が判明した⁽³⁾。

- 6) 低緯度で観測されるホイスラの全ての周波数(1~8kHz)が電離層を下降透過できるとは限らない。
- 7) 観測されるホイスラに電離層下降透過点の周波数依存性が全く見られないが、ノンダクト伝搬では周波数が高くなるにつれ高緯度側で電離層を下降透過するという周波数依存性が見られる。

これらの理論解析は観測結果と異なることを明らかにした⁽³⁾。

以上の解析結果より、超低緯度で観測されるホイスラは実験的にも理論的にもダクト伝搬であるとした。しかし、超低緯度でホイスラがダクト伝搬するには数100%以上ものエンハンスメントファクタ(Enhancement factor)が必要であることも明らかにされている⁽⁴⁾。このように高いエンハンスメントファクタが、ホイスラが観測される時間帯に常時発生しているとは容易には考えられない。かつまた、我々が用いたレイトレーシングは磁場がダイポール近似で電磁波の伝搬路を、地上からの高さと緯度方向による2次元であり、経度方向の影響は考慮してなかった。このため、特に超低経度においては国際基準磁力線(IGRF)モデルに対する経度方向も加味した3次元モデルでの理論計算も必要であることを指摘していた⁽³⁾。

今回、我々はIGRF磁場モデルによる3次元レイトレーシングでの超低緯度ホイスラの伝搬特性を解析し、2次元レイトレーシングでは得られなかった新たな解析結果を得たのでその一部を報告する。

2. 3次元モデルを用いたノンダクト伝搬のレイトレーシング

我々はCairo and Lefevre⁽⁵⁾, Muto et al.⁽⁶⁾, Liang et al.⁽⁷⁾, Zhou et al.⁽⁸⁾らが用いた3次元レイトレーシングを使用した。超低緯度においては実際の地球磁場はダイポール磁場モデルと大きく異なることが指摘されているので⁽⁹⁾、我々は実際の磁場により近い1990年のIGRFモデルを用いた。ダイポールを用いないレイトレーシングの困難さは主として磁力線に沿った電子密度関係つまり、磁力線に沿った拡散平衡分布やこのモデルでの一般解を得る複雑さにある。そこで、本論文においてはより簡単な手法である球面を階層化し緯度および経度方向に配慮した拡散平衡モデルを仮定した。また、レイトレーシングに用いた電子密度分布モデルはISS-b衛星で得られたデータを用いている⁽¹⁰⁾。超低緯度でのホイスラの発生は通常夜間のみを観測されるため、夜間の

拡散平衡モデルの電子密度分布を用いた。

電子密度分布の一般式は木村がモデル化した下部電離層の影響を考慮し⁽¹¹⁾、次式で表せる。

$$N_e(r, \theta, \phi) = N_{DE}(r) \times N_\theta \times N_L \quad (1)$$

ここで、 r は地球中心からの距離で、 θ, ϕ はそれぞれ地理緯度と経度を表し、電子密度の背景プロファイルは拡散平衡モデル $N_{DE}(r)$ である。また、 N_θ は赤道に対し負の緯度方向の傾きを示すものであり、(2)式で与えられる⁽¹²⁾。

$$N_\theta = 1.0 + C(r) \exp \{ \alpha (\sin \theta - \sin \theta_0) \} \quad (2)$$

ここで、 $C(r)$ 、 α 、 $\sin \theta_0$ はSingh⁽¹³⁾, Miyazaki⁽¹⁰⁾, Thomson⁽¹⁴⁾によってモデル化された緯度方向のイオンの傾きの大きさと分布の範囲を示すパラメータである。また、 N_L はE-W方向の電子密度分布(経度方向の傾き)であるが、今回は N_L が一定とした。(1)式における電子密度プロファイルのパラメータはMiyazakiらによって得られたデータに適応している。背景拡散平衡モデルのパラメータは $T_e = 1000^\circ\text{K}$, $O^+ = 92.68\%$, $He^+ = 5.48\%$, $H^+ = 1.84\%$, $h_{ref} = 500\text{km}$ ($R_{base} = 6872\text{km}$) である。また、各パラメータは $\alpha = 5$, $\sin \theta_0 = 0.94$ で R_{base} における背景電子密度は $4.0 \times 10^4 \text{cm}^{-3}$ とし、 $C(r)$ は $C_0 = 0.5$ とし、次式で与えた⁽¹²⁾。

$$\left. \begin{aligned} C(r) &= C_0 \{1 - (r - 6772)^2 / 280^2\} & 6492 < r < 6772 \\ C(r) &= C_0 \{1 - (r - 6772)^2 / 1100^2\} & 6772 < r < 7872 \\ C(r) &= 0 & r < 6492 \text{ or } r > 7872 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

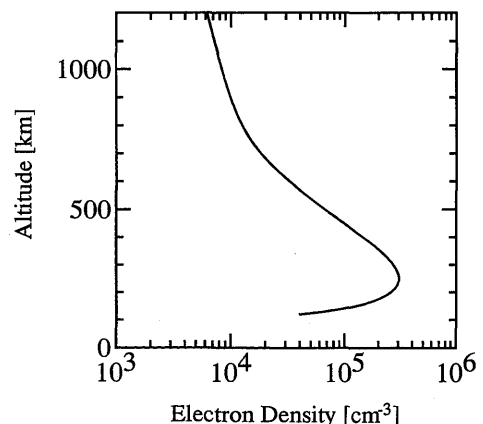


図2 夜間電離層における電子密度分布のプロファイル

3. ノンダクト伝搬の計算結果

第2図にこれらのパラメータを用いた夜間電離層における電子密度分布モデルを示す。

我々は1988年1月5日から1月11日まで超低緯度における夜間ホイスラの伝搬特性を解明するために中国で毎日地方時00時より04時までの多点同時観測を行った⁽²⁾。ここでは、観測期間で超低緯度ホイスラが最も多く観測された地磁気緯度10°におけるZhanjiangを想定したレイトレーシングを行うものとする。夜間における下部電離層の高度を120kmとし、2次元レイトレーシングと同様に5kHzの周波数で121kmの高度で天頂方向(入射角 $i=0$)に打ち上げるものとする。電離層下端での透過条件は入射角を i_1 、透過角を i_2 、それぞれの媒質の屈折率を n_1 、 n_2 とすれば(4)式が成立する。

$$\sin i_1 / \sin i_2 = n_2 / n_1 \quad (4)$$

ここで、 n_1 は計算を終了した高度120kmでの屈折率であり、電離層下端での $i_2=90^\circ$ 、 $n_2=1$ 、 $n_1=80$ での透過円錐(Transmission Cone)の角度を求め、Wave normal direction (以下、単にレイの方向と記す)が透過円錐内にあるか否かで透過または反射であるかを決定した⁽³⁾。

第3図(図中の●は電離層を下降透過したことを表す)は上記電離層モデルで地理経度を110.3°Eに固定した南半球での鉛直打ち上げにおける地理緯度と最終到達地理緯度の関係を示している。入射地理緯度が概ね0.0°と4.1°Sの2カ所の緯度⁽¹⁴⁾において、ホイスラが到達した北半球では電離層下端で透過円錐内にあることが判明した。また、0.0°と4.1°Sと比較すると0.0°の方が入射緯度と最終到達緯度とが緩やかに変動しており、0.0°前後がホイスラの透過領域と推定できる。これは2次元レイトレーシングの場合と同様の結果である⁽³⁾。また、各緯度における鉛直打ち上げでの伝搬経路を第4図に示す。図より、地理緯度0.0°、経度110.3°E前後に電離層上昇透過点が存在する場合に北半球の17°N近傍に集中してホイスラが地上で観測されることを示している。

従来の2次元レイトレーシングでは伝搬路の周波数特性より、

1. ノンダクト伝搬が可能な周波数帯域は限られている。
2. 周波数が高くなるほど分散値が大きくなる。
3. 電離層下降透過点は周波数が高くなるほど高緯度側に降下する。

などの結論が得られ、超低緯度で観測されたホイスラの

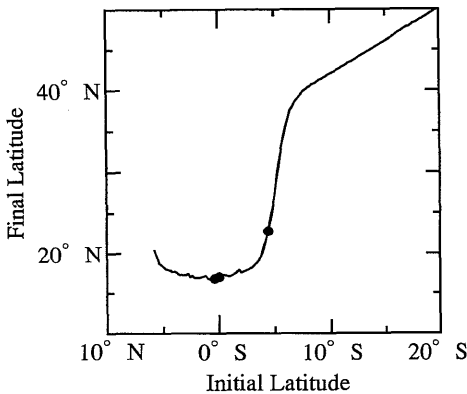


図3 鉛直打ち上げによる入射地理緯度と到達緯度の関係

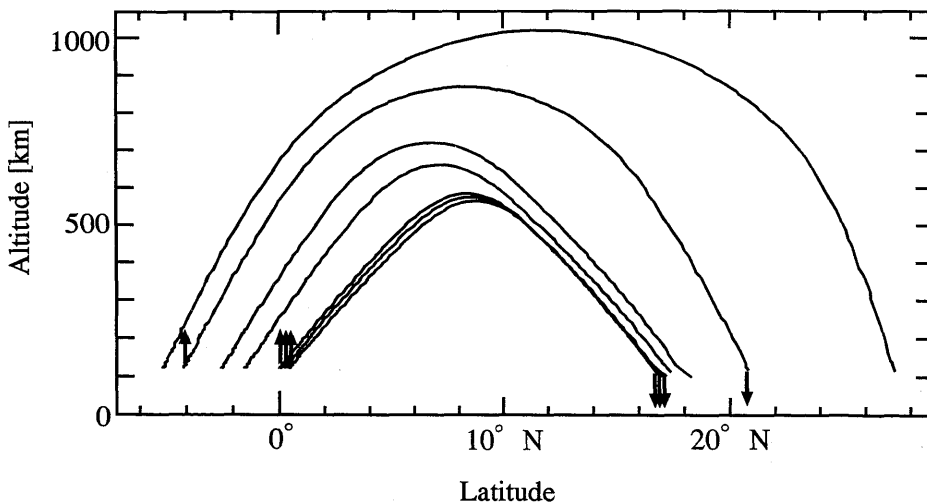


図4 各緯度におけるノンダクト伝搬路

伝搬特性とは異なることより、ダクト伝搬であると結論づけられていた。

今回の3次元レイトレーシングでは、打ち上げ角度は鉛直方向より緯度方向の角度を δ 、経度方向の角度を ϵ で表し、北と東の方向をそれぞれプラスで示した。例えば第3図における 0.0° の鉛直打ち上げを経度方向に $\pm 3^\circ$ 傾けることにより入射緯度と最終到達緯度の特性曲線は移動することが明らかになった。この状態を第5図(図中の●は電離層を下降透過したことを表す)に示す。つまり、地理緯度 0.0° で経度方向に -3° から $+3^\circ$ に広がっ

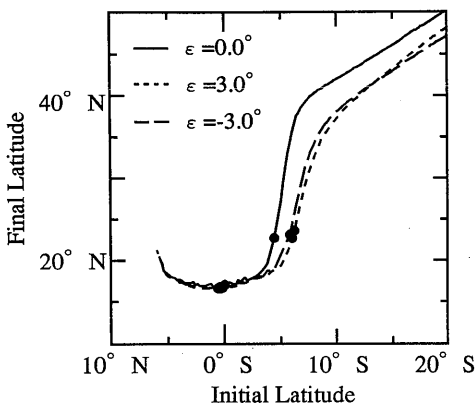


図5 経度方向に打ち上げ角度を変化させた場合における入射地理緯度と到達緯度の関係

て放射される電磁波は最終到達緯度が 17°N 近傍で電離層を下降透過することが分かった。

また、 5kHz で 0.0° より鉛直打ち上げたホイスラ波は最終到達緯度が 17.0°N で電離層を下降透過でき、実際に観測されるホイスラ周波数 $1\text{kHz}\sim 8\text{kHz}$ でも電離層を透過する。しかし、 0.0° を僅かにずらした場合は鉛直打ち上げでは一部透過できない周波数帯域が存在することは2次元レイトレーシングと同様であった。しかし、その透過できない周波数であっても経度方向への打ち上げ角度を僅かに変化させることにより 17.0°N の近傍で電離層を下降透過できる。つまり、2次元レイトレーシングでは従来電離層を下降透過できないと理解されていた打ち上げ緯度または周波数であっても、打ち上げ角度を経度方向に極く僅か傾けることにより反対半球に下降透過できた。またその場所は以前透過できた地点の極めて近傍であることが示された。一般に、ホイスラの源となる雷放電によって発生する電磁波は、広い角度で下部電離層を上昇透過するはずであり、鉛直方向を中心としスネルの法則で定まる円錐角度で緯度、経度方向にレイの方向が広がって分布していると推定される。よって、電子密度分布モデルで定まる特定の場所では鉛直

打ち上げで電離層下端を上昇透過した電磁波が電離層及び磁気圏をノンダクト伝搬し、反対半球の電離層を垂直透過できる。そして、その特定場所の緯度方向、経度方向の広がったエリアには、他の角度つまりスネルの法則で定まる透過円錐角度で上昇した電磁波がホイスラとなって到来することを意味している。第6図は地理緯度を 4.1°S 、経度を 110.3°E に固定した場所から打ち上げ角度を $\delta = -5^\circ$ から $+5^\circ$ 、 $\epsilon = -5^\circ$ から $+5^\circ$ まで変化させたとき、反対半球で電離層を下降透過できた範囲を示したものである。この地理緯度及び経度において第4図より明らかなように、鉛直打ち上げでは反対半球の地理緯度 21.3°N の電離層を下降透過する地点である。このときの地理経度は 110.7°E であり、Zhanjiang上空ではない。しかし、打ち上げ角度を経度方向に極く僅か $\epsilon = -0.2^\circ$ に変化させることによりホイスラはZhanjiangの上空に下降透過でき、その分散値は $11.8\text{ (s}^{1/2}\text{)}$ である。また、この地理緯度、経度で打ち上げ角度を変化させた場

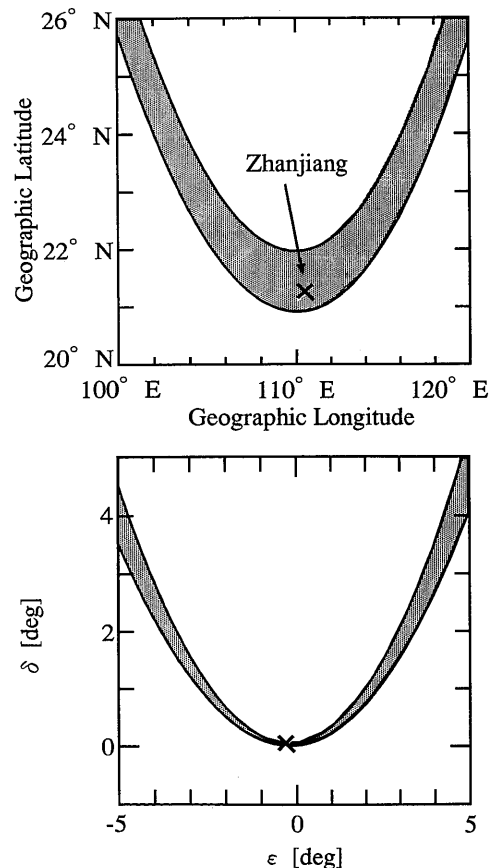


図6 南半球の特定地点で打ち上げ角度を変化させた場合、電離層を下降透過できる地点の分布図

合、反対半球の透過点は経度方向かつ高緯度方向への広がりを持って存在していることが分かる。このことより、ノンダクト伝搬であっても北半球の Zhanjiang 上空に電離層を下降透過したホイスラ波は、高緯度側へと伝搬する傾向にあることが言える。

我々は、1988年1月5日に観測された夜間ホイスラの先行空電発生位置測定をトゥィーク空電を用いて測定し、その解析結果を既に報告している⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。その解析結果では、先行空電の発生場所は Zhanjiang の地磁気対称点から経度方向に 800~1500km も離れた地点で発生した雷放電がホイスラの源となっていることが判明した。この特性は、緯度方向よりも経度方向に傾けて打ち上げた場合に、北半球の電離層を下降透過する傾向を持った今回のレイトレーシングの解析結果とよく符号している。

超低緯度で発生するホイスラがダクト伝搬であると言われる一番の論拠は数多くのエコートレインホイスラが観測されることにある⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁹⁾。2次元レイトレーシングにおいてはエコートレインホイスラを発生させると同一伝搬路を通らないため、また電離層を下降透過できる地点が電離層のモデルで固定されるため容易に同一場所で電離層を下降透過できない。かつまたショート (Short) ホイスラとエコートレインホイスラの分散値が 1:3 の関係にならない。しかしながら、この場合においても 3次元レイトレーシングでは反射地点における緯度、経度方向の傾きを考慮することによりエコートレインホイスラを発生させることが可能である。

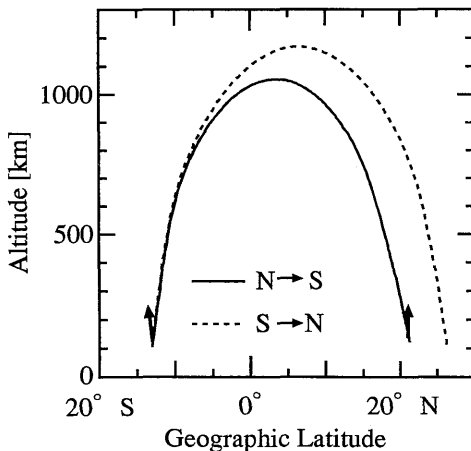


図7 Zhanjiang で下降透過できないエコートレインホイスラの伝搬例

まず、緯度、経度方向の傾きを考慮しない鉛直の打ち上げの例を第7図に示す。図において地理緯度 21.3°N の Zhanjiang で観測されたホイスラは電離層を垂直下

降していると考えるのが一般的であろう。よって、ホイスラ波の一部分が電離層または大地で反射され再び磁気圏へ伝搬すると仮定してもその打ち上げ角度は鉛直方向と推定される。この角度で Zhanjiang を反射した一部のホイスラ波は先行空電の発生した南半球の電離層 (地理緯度 13.1°S) に到達する。電離層高度 120km では入射角は緯度方向に 3.9°でスネルの法則で定まる円錐角度には入れず電離層を下降透過できない。この全反射されるホイスラ波は打ち上げ角度 -3.9°で南半球を離れ再び北半球の電離層 (地理緯度 26.3°N) に到来する。このとき入射角は -1.8°で、やはり全反射となる。このため、南半球における電離層の傾きを考慮しない限り、Zhanjiang では観測されないことになる。しかしながら、電離層の傾きを考慮して打ち上げ角度を $\delta = -5^\circ$ から $+5^\circ$ 、 $\epsilon = -5^\circ$ から $+5^\circ$ まで変化させても、Zhanjiang 上空の電離層を下降透過するホイスラは存在しなかった。そこで、南半球と北半球の両方で電離層の傾きを考慮する必要がある。

一方、3次元レイトレーシングによる解析例を第8図に示そう。

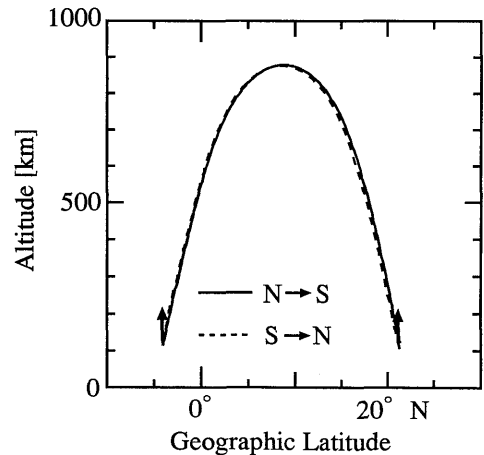


図8 Zhanjiang で下降透過できるエコートレインホイスラの伝搬例

第7図の場合と同様に、21.3°N の Zhanjiang で観測された分散値 11.8 (s^{1/2}) のホイスラ波は Zhanjiang で電離層を垂直透過しているとしよう。Zhanjiang における電離層下端でスネルの法則で定まる透過円錐角度に入らなかったホイスラ波は全反射されるか緯度方向、経度方向の影響について検討する。Zhanjiang での電離層高度 120km において、打ち上げ角度を $\delta = -5^\circ$ から $+5^\circ$ 、 $\epsilon = -5^\circ$ から $+5^\circ$ まで変化させた場合、反対半球である南半球の電離層を下降透過できた範囲を示

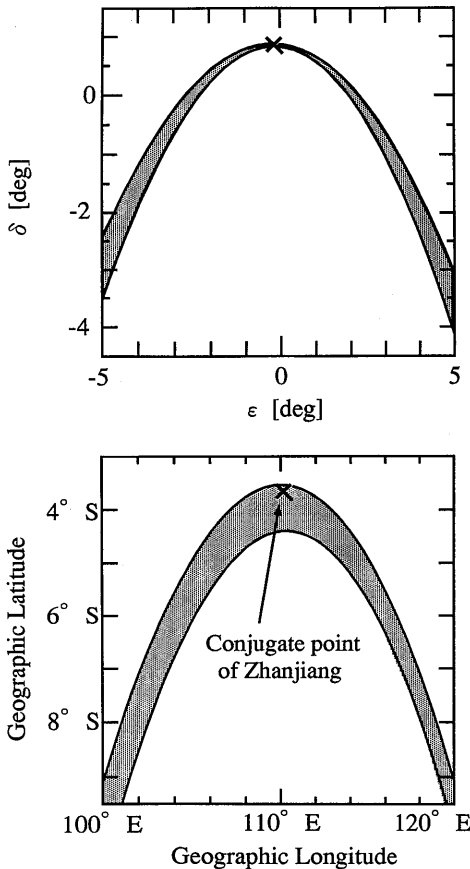


図9 Zhanjiang で打ち上げ角度を変化させた場合、電離層を下降透過できる地点の分布図

す。

第7図より明らかなように $\delta=0^\circ$, $\epsilon=0^\circ$ では南半球の電離層を下降透過できず, $\delta=0.8^\circ$, $\epsilon=-0.1^\circ$ で最も赤道より伝搬することが分かる。この地点は地理緯度が 4.1°S , 経度が 110.3°E であり, 分散値が $11.8(\text{s}^{1/2})$ となった。またこの地点より, 再度 $\delta=0.0^\circ$, $\epsilon=-0.2^\circ$ で打ち上げれば Zhanjiang に分散値 $11.8(\text{s}^{1/2})$ で垂直透過できることが分かった。よって, この伝搬路をたどれば最初に Zhanjiang で観測されるホイ斯拉の分散値 $11.8(\text{s}^{1/2})$ と $35.4(\text{s}^{1/2})$ のエコートレインホイ斯拉が Zhanjiang で地上観測されることになる。

最後に, ホイ斯拉の電離層下降透過点の周波数依存性について検討しよう。従来の2次元レイトレーシングでは実際観測されるホイ斯拉の周波数帯域に比べ, 比較的狭い範囲の周波数のみが電離層を下降透過するため超低緯度ホイ斯拉はノンダクト伝搬ではないとされてきた⁽³⁾。しかしながら, 3次元レイトレーシングでは既に第4図に示した地理緯度 0.0° , 経度 110.3°E では観測さ

れたホイ斯拉の周波数 $1\sim 8\text{kHz}$ ⁽³⁾の全てが伝搬できた。また, ホイ斯拉が電離層を鉛直透過する緯度が 0.0° から増減することにより, 2次元レイトレーシングと同様に特定周波数では電離層を下降透過できない場合も発生した。しかしながら, この場合であっても緯度, 経度方向の打ち上げ角度を考慮することにより, 観測されたホイ斯拉の全周波数が下降透過できた。

これら3次元レイトレーシングの解析結果は, 従来ノンダクト伝搬ではないとされてきた超低緯度ホイ斯拉の伝搬特性を否定するものであり極めて興味深い結果となった。

4. むすび

IGRF 磁場モデルによる3次元レイトレーシングで超低緯度ホイ斯拉の伝搬特性を解析した。その結果, 特定電子密度分布のモデルで鉛直打ち上げを行った場合, 従来の2次元レイトレーシングと同様に特定緯度のみに電離層を下降透過できるノンダクト伝搬路が生成された。

しかし, 緯度, 経度方向に打ち上げ角度を変化させた場合は, 鉛直打ち上げにおいて電離層を下降透過した近傍に幅広く透過することが判明した。しかも, ノンダクト伝搬であっても高緯度側に伝搬する傾向があり, 電離層下降透過点の周波数依存性も見られない条件を求めることが可能であることを示した。かつまた, 南, 北の両半球で緯度, 経度方向の傾きを考慮すれば, ショートホイ斯拉と同様にエコートレインホイ斯拉も伝搬できることを示した。さらに, 北半球の電離層において, 緯度, 経度方向に角度を傾けて打ち上げることより, 南半球の電離層で反射して再び北半球の電離層を下降透過し, エコートレインホイ斯拉となりうる可能性も示した。今回は一例の電子密度分布モデルにおける解析結果を示したが, そのモデルを変えた場合は, 電離層を下降透過する地点が異なった。しかし, 第6図, 第9図で示す伝搬特性の傾向は変わらないことを確認している。今後さらに電離層モデル, 緯度, 経度, 打ち上げ高度を変え, 細かな解析を行いたい。

謝 辞

中国におけるホイ斯拉の観測は武漢大学宇宙空間物理系との協力で行われたものであり, 3次元レイトレーシングで資料の提供を頂いた B. X. Liang 教授, Z. T. Bao 教授, J. S. Xu 教授に感謝する。また, 常に御指導を頂く本学の三上 修教授に深謝する。

参 考 文 献

- 1) Helliwell R. A. : "Whistlers and related ionospheric phenomena", Stanford Univ. Press, pp. 23-82 (1965).
- 2) 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斯拉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).
- 3) 太田健次, 友松 通, 高橋 修, 早川正士: "レイトレーシングによる超低緯度ホイ斯拉の伝搬特性", 信学論(B-II), J75-B-II, 5, pp. 309-314 (1992).
- 4) 中村義勝: "沖縄で観測されたホイ斯拉の到来方位特性", 信学論 (B-II), J75-B-II, 4, pp. 229-238 (1992).
- 5) Cario L. and Lefeuvre F.: "Localization of sources of ELF/VLF hiss observed in the magnetosphere; three dimensional ray tracing", j. Geophys. Res., 91, 4352-4364 (1985).
- 6) Muto H. and Hayakawa M. : "Ray-tracing study of the propagation of whistler-mode VLF emissions with frequency above one half the gyro-frequency", Planet. Space Sci., 35, pp. 1397-1404 (1987).
- 7) Liang B. X., Bao Z. T. and Xu J. S.: "Propagation characteristics of nighttime whistlers in the region of equatorial anomaly", J. Atmos. Terr. Phys., 47, pp. 999-1007 (1985).
- 8) Zhou H. B., Xu J. S. and Hayakawa M. : "On the Longitudinal effect in whistler propagation characteristics at low latitudes", Planet. Space Sci., 36, pp. 833-839 (1988).
- 9) Ondoh T., Kotaki M., Murakami T., Watanabe S. and Nakamura Y.: "Propagation characteristics of low-latitude whistlers", J. Geophys. Res. 84, pp. 2097-2104 (1979).
- 10) Miyazaki S., Iwamoto I., Sagawa E. and Mori H. : "Global features of the topside ionospheric parameters obtained from the ISS-b observations", COSPAR Symp. on Results from IMS Space Craft, Ottawa, Canada (1982).
- 11) Kimura I. : "Effects of ions on whistler mode ray tracing", Radio Sci., 1, pp. 269-283 (1966).
- 12) Xu J, S. : "A study of ray tracing of whistlers in equatorial ionosphere observed at multistations", Thesis for a doctorate. Wuhan Univ. pp. 59-67 (1985).
- 13) Singh B. : "On the ground observations of whistlers at low latitudes", J. eophys. Rse., 81, pp. 2429-2432 (1976).
- 14) Thomson N.R. : "Ray-tracing the paths of very low latitude whistler-mode signals", J. Atmos. Terr. Phys., 49, pp. 321-338 (1987).
- 15) 太田健次, 早川正士, 島倉 信, 友松 通: "低緯度におけるホイ斯拉の発生頻度とその反対半球における雷放電活動", 信学論(B-II), J74-B-II, 5, pp. 276-284 (1991).
- 16) Hayakawa M. Ohta K. and Shimakura S. : "Recent findings on the proration of low latitude whistlers", J. Atmos. Terr. Phys., 57, pp. 485-492 (1995).