

Ray Tracing による超低緯度ホイ斯拉の伝搬

友松 通*, 太田 健次**, 馬場 清英**, 江口 博之**, 早川 正士***

The Propagation Path Estimation of Very Low Latitude Whistlers by Ray Tracing Method

Tooru TOMOMATSU*, Kenji OTA**, Kiyohide BABA**,
Hiroyuki EGUCHI**, and Masashi HAYAKAWA***

(Received May 31, 1991)

Some important contributions to the study of very low latitude whistlers have recently been made by several workers. But their conclusions are sometimes contradictory to each other. On the basis of observation at very low latitudes in China, we have found that the whistlers observed at a geomagnetic latitude of 10° - 14° are more likely to be due to ducted propagation than nonducted.

In this article, we try to give an explanation of ducted propagation on the basis of theoretical analysis. The propagation mechanism of very low latitude by the ray tracing computations is carried out for a wide frequency range from 1kHz to 10kHz.

1. まえがき

ホイ斯拉の伝搬には地磁気力線に沿って生成された周囲より電子密度の濃いダクト (Duct) と呼ばれる通路を伝搬するダクト伝搬と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 (Nonduct) 伝搬がある¹⁾。ノンダクト伝搬による伝搬通路は地球の磁力線から大きくずれ、一般に波面の法線方向 (Wave Normal Direction) が外側を向き電離層を透過できない^{2),3)}。また、ノンダクト伝搬では往復路で同一通路を伝搬する

とは限らないため分散値が一定比となるエコートレインホイ斯拉 (Echo Train Whistler) の発生が説明できない。よって、地上で観測されるホイ斯拉は高緯度であれ低緯度であれダクト伝搬であるとされている^{4),5)}。しかしながら、超低緯度ではホイ斯拉伝搬のダクトを生成するためには周囲電子密度に対するダクト内の増加電子密度の比から求まるエンハンスメントファクタ (Enhancement Factor) が100%以上にも達し非現実的なものとなってしまう。

このため、超低緯度におけるホイ斯拉伝搬メカニズムの研究が盛んに行われた。1979年に恩藤らによって行われた地磁気緯度 15.3° の沖縄での観測結果より、エコートレインホイ斯拉の発生から磁力線沿い伝搬であるという結論に達した。また、多点同時観測での結果より

*工学研究科電気工学専攻 (Department of Electronic Engineering)
現 川崎重工勤務

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

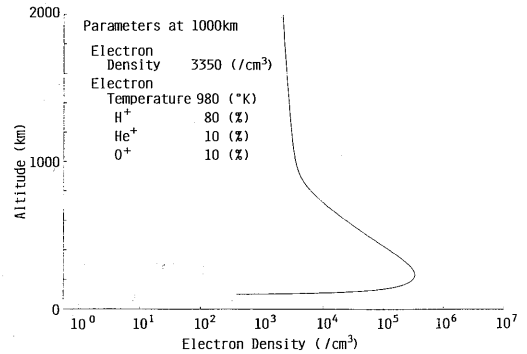
***電気通信大学 (The University of Electro-Communications)

ホイスラの観測される下限地磁気緯度は概ね石垣島の地磁気緯度 12.9° であると推論した⁶⁾。一方, Liangらは1985年に行った赤道域を含む中国超低緯度でのホイスラの多点同時観測より地磁気緯度が 5.5° の赤道域においても夜間ホイスラが観測されることを示し, Ray Tracingによる理論解析から地磁気緯度が 10° 近傍に好条件のノンダクト伝搬路が存在するとした⁷⁾。また, このようなRay Tracingにより計算された地磁気緯度 10° 近傍のノンダクト伝搬路の存在はAndrews^{8),9)}やThomson¹⁰⁾によっても支持されている。但し, これらの理論計算において, AndrewsとThomsonは二次元Ray Tracingにより計算を行い, Liangらは三次元Ray Tracingで現実的な赤道異常の効果を含む電離層モデルを用いて計算を行っている。しかし, ホイスラの広周波数地域での詳しい解析は述べられていない。

我々が1988年1月5日から1月11日まで中国において行なった超低緯度夜間ホイスラの到来方向多点同時観測の解析結果では, 安定したホイスラの電離層下降透過点の存在, 下降透過地点の周波数依存性, 高緯度側への強い伝搬傾向などから超低緯度(地磁気緯度 $10^\circ \sim 14^\circ$)で発生する夜間ホイスラは磁力線沿い伝搬であるという結論に達した¹¹⁾。これら相矛盾する実験的な解析結果と理論計算による解析結果を比較するため, 二次元Ray Tracingプログラムを用い, ホイスラの広周波数帯域(1~10 kHz)についてノンダクト伝搬路の計算を種々の電離層モデルについて行った。ここで, 二次元Ray Tracingとは, 電磁波の伝搬路を地上からの高さや緯度方向に対して追跡するものである。また, 地球磁場は, ダンポール近似を用いている。

2. 電離層モデル

Ray Tracingの計算において, 最も重要となる電離層モデルは, 地上から高さ1000kmにおける電子密度, H^+ と He^+ と O^+ の成分比, 電子温度を設定し, 拡散平衡モデルによって求められる。電離層の下端は高さ100kmと仮定し, 電子密度は沖縄(地磁気緯度約 15°)で観測された f_oF_2 の平均値から F_2 層の電子密度が 3×10^3 (cm^{-3})になるように設定した。 H^+ と He^+ と O^+ の成分比は, Andrewsが用いた電離層モデルと等価にするために80:10:10(%)に設定した。また, 電子温度については, 900から1050 ($^\circ K$)まで $10^\circ K$ 刻みに変化させ電子密度プロファイルの勾配の効果を変えた。一例として第1図に電子温度が $980^\circ K$ の時の電離層モデルを示す。



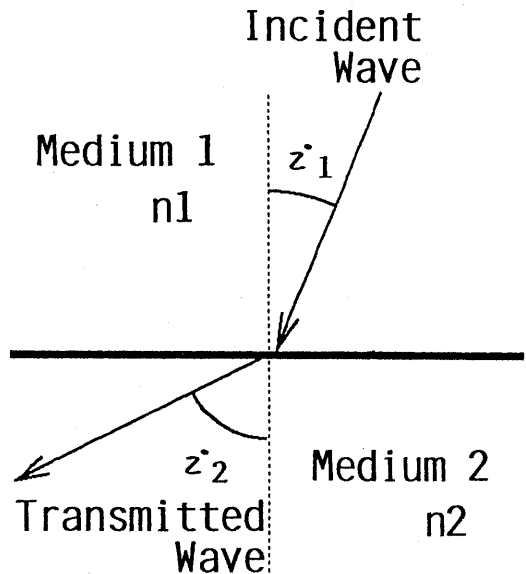
第1図 電離層モデル

3. Ray Tracingによる計算

Ray Tracingの計算で反対半球における入射波は, 地上から高さ100kmの地点で電離層に垂直入射するものと仮定した。電離層下降透過の評価は計算を終了した高さにおける電離層下端において第2図に示すスネルの法則に従って求められる。媒質1と媒質2における入射角を 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(1)式が成立する。

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1)$$

ここで, n_1 は計算を終了した高さにおける屈折率であり, $i_2=90^\circ$, $n_2=1$ としてスネルの法則から透過円錐(Transmission Cone)の角度を求め, Wave Normal Directionがこの透過円錐内にあるか否かで透過か反射かを決定した¹²⁾。



第2図 スネルの法則

また、右回りモードの屈折率は(2)式で表される。

$$n^2 = 1 - \frac{2X}{2 - \frac{Y^2 \sin^2 \theta}{1-X} - \left\{ \frac{Y^4 \sin^4 \theta}{(1-X)^2} + 4Y^2 \cos^2 \theta \right\}^{1/2}} \quad (2)$$

ここで、 X , Y は、プラズマパラメータを示し、それぞれ(3), (4)式で表される。

$$X = f_p / f \quad (3)$$

$$Y = f_H / f \quad (4)$$

但し、 f_p はプラズマ周波数、 f_H はジャイロ周波数、 f はホイ斯拉の周波数である。 f_p および f_H は(5), (6)式で表される。

$$f_p = \frac{Ne^2}{4\pi\epsilon_0 mf^2} \quad (5)$$

$$f_H = f_{Heq} \frac{R_0^3}{R^3} (1 + 3 \sin^2 \Lambda)^{1/2} \quad (6)$$

(5), (6)式のパラメータを以下に示す。

N : 計算する位置の電子密度	個/cm ³
m : 電子の質量	9.11×10^{-31} kg
e : 電子の電荷量	1.602×10^{-19} c
ϵ_0 : 真空中の誘電率	8.854×10^{-12} F/m
f_{Heq} : 赤道の地上における電子ジャイロ周波数	880 kHz

R_0 : 地球の半径

6372 km

R : 地球中心からの距離

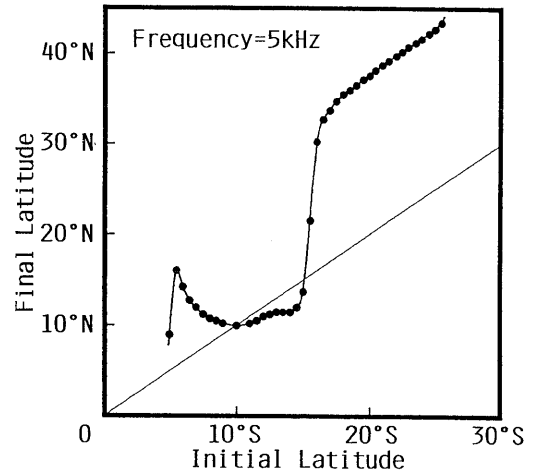
km

Λ : 地磁気緯度

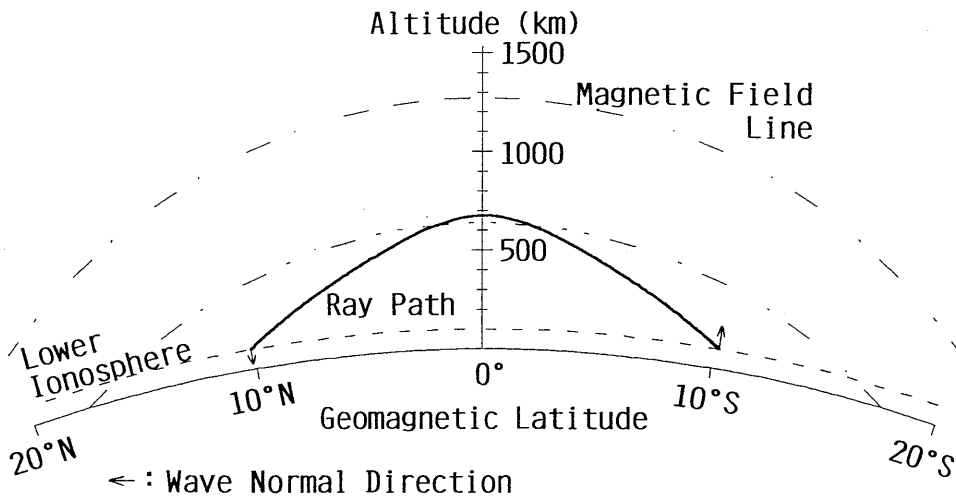
deg

4. ノンダクト伝搬路の計算結果

第3図は、電子温度が990° Kの電離層モデルにおける5 kHzでの入射緯度と最終到達緯度の関係を示している。この図から、最終到達緯度が入射緯度と地磁氣的にはほぼ共役な関係となるのは、入射緯度が10.2° Sと15.0° Sの場合であることが判明し、このとき電離層下端におけるWave Normal Directionはほぼ0°となり透過円錐の中に入り電離層を下降透過でき、地磁気緯度10°近傍にノンダクト伝搬路が存在することが確認された。



第3図 入射緯度と最終到達緯度の関係



第4図 5 kHz成分のRay Path

第4図に5 kHzでのRay Pathを示す。そして、1～10 kHzの周波数に対し0.1 kHz刻みで、この10.2°のノンダクト伝搬路が成立するかについて調べた結果、周波数が1.1～1.3 kHz, 7.4～8.9 kHz, 9.7～9.9 kHzの範囲で電離層を下降透過できず全反射される。しかし、我々が1988年中国超低緯度において観測したホイスラは、約1～8 kHzの周波数成分を持つことから、この条件で生成されるノンダクト伝搬路は観測結果と矛盾する。

表1 周波数と分散値, 電離層下降透過点の関係

周波数 (kHz)	高さ (km)	分散値 (s ^{1/2})	地磁気緯度 (deg)
* 1.3	100.59	14.21	10.12
2.9	100.89	14.21	10.17
4.5	100.57	14.30	10.20
5.0	100.50	14.33	10.20
6.6	100.81	14.44	10.21
6.7	100.78	14.45	10.22
6.9	100.72	14.46	10.22
9.2	101.50	14.63	10.23

*印は、電離層を透過できなかったことを示す

また、周波数に対する分散値と電離層下降透過点の変化を表1に示す。但し、計算終了時の高さが異なると最終到達緯度に誤差がでるため、計算終了時の高さが101±1 kmのものを選んだ。ホイスラの分散値Dは、ホイスラの伝搬時間を t (s), 周波数を f (Hz)とすれば(7)式で表される。

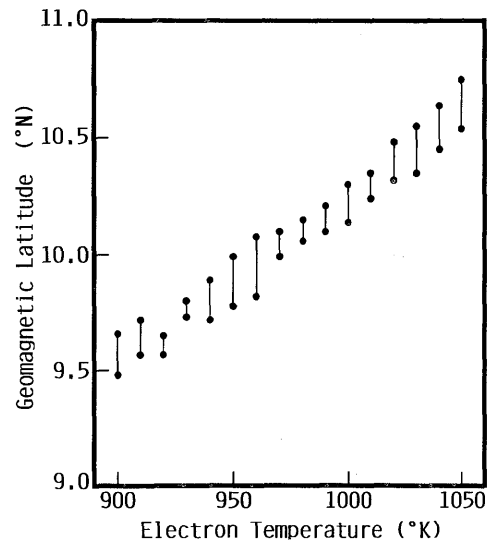
$$t = Df^{-1/2} \quad (7)$$

表1より、分散値は、周波数が高くなるほど大きくなる傾向がある。また、電離層下降透過点は周波数が高くなると明らかに高緯度側となることが判明し、1～8 kHzの間に15km程度の隔たりがあるという結果となった。しかしながら、この解析結果も我々が1988年に行った観測結果では、ホイスラの電離層下降透過点にはこのような周波数依存性は見られなかった。

なお、これらの解析結果

- (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、

は地上より高さ1000kmでの電子温度を変化させても全く同一の傾向を示した。



第5図 電子温度と緯度の関係

次に、最終到達緯度における電子温度の変化について検討を行った。第5図に電子温度に対する最終到達緯度の変化を示す。但し、周波数により最終到達緯度が変化するためプロット点に幅をもたせてある。また、初期緯度は、その電子温度において、共役な位置に来るように設定した。この図から電子温度が高くなると高緯度側が地磁気共役点になり、地磁気緯度10度が地磁気共役点となるのは、電子温度が約960 (°K) の時であることが判明した。

5. むすび

超低緯度において地上観測されるホイスラがダクト伝搬であるか、またはノンダクト伝搬であるかを解明するため広周波数帯域(1～10 kHz)にわたる二次元Ray Tracingによるノンダクト伝搬路の理論計算を行なった。その計算結果と電磁界解析法で求めた中国赤道領域を含む多点同時観測によるホイスラの到来方向測定の結果¹³⁾とを比較し以下に示す違いを見いだした。

- (1) 観測されたホイスラは、約1～8 kHzの周波数成分を持つのに対し、ノンダクト伝搬では1.3 kHz以下の周波数は電離層を下降透過できない。
- (2) 観測されたホイスラの電離層下降透過点には、周波数の依存性が全くみられないのに対し、ノンダクト伝搬では周波数が高くなると高緯度側で電離層を下降透過する。

以上の解析結果から、中国の超低緯度（地磁気緯度 $10^{\circ} \sim 14^{\circ}$ ）で発生するホイ斯拉は理論計算からもダクト伝搬であると強く推定される。

6. 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、解析結果について有意義な御助言を頂いた電子工学科三上 修教授、Ray Tracing のプログラムで御指導頂いた名古屋大学太陽地球環境研究所服部克巳氏に深謝する。

参 考 文 献

- 1) R. A. Helliwell: "Whistlers and Related Ionospheric Phenomena", pp. 43-51, Stanford Univ. Press, CA (1965).
- 2) K. Maeda and I. Kimura: "Calculation of the propagation path of whistling atmospherics", J. Atmosph. Terr. Phys., 15, pp. 62-65 (1959).
- 3) R. L. Smith: "Propagation characteristics of whistlers trapped in field-aligned columns of enhanced ionization," J. Geophys. Res. 66, pp. 3699-3707 (1961).
- 4) K. Bullough and J. L. Sagredoh: "VLF goniometer observations at Halley Bay, Antarctica- I. The equipment and the measurement of signal bearing", Planet. Space Sci., 21 pp. 899-912 (1973).
- 5) M. Hayakawa and J. Ohtsu: "Ducted propagation of low latitude whistlers deduced from the simultaneous observations at multistations", J. Atmosph. Terr. Phys., 35, pp. 1685-1691 (1973).
- 6) T. Ondoh, M. Kotani, T. Murakami, S. Watanabe and Y. Nakamura: "Propagation characteristics of low-latitude whistlers", J. Geophys. Res., 84, pp. 2097-2104 (1979).
- 7) B. X. Liang, T. Bao and J. S. Xu: "Propagation characteristics of nighttime whistlers in the region of equatorial anomaly", J. Atmosph. Terr. Phys., 47, 999-1007 (1985).
- 8) M. K. Andrews: "Non-ducted whistler-mode signals at low latitudes", J. Atmosph. Terr. Phys., 40, pp. 429-436 (1978).
- 9) M. K. Andrews: "On whistlers with very small dispersion" J. Atmosph. Terr. Phys., 41, pp. 231-235 (1979).
- 10) N. R. Thomson: "Ray-tracing the paths of very low latitude whistler-mode signals", J. Atmosph. Terr. Phys. 49, pp. 321-338 (1987).
- 11) 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設定", 信学論 (BII), J73-BII, 4, pp. 182-189 (1990).
- 12) R. A. Helliwell: "Whistlers and Related Ionospheric Phenomena", pp. 51-61, Stanford Univ. Press, CA (1965).
- 13) M. Hayakawa, K. Ohta and S. Shimakura: "Spaced direction finding of nighttime whistlers at low and equatorial latitudes and their propagation mechanism", J. Geophys. Res., 95, pp. 15091-15102 (1990).