

超低緯度ホイ斯拉の3次元レイトレーシング

田中 明博*, 神崎 浩史*, 太田 健次**, 早川 正士***

Very Low Latitude Whistlers of Three-Dimensional Ray Tracing

Akihiro TANAKA*, Hiroshi KANZAKI*, Kenji Ota**,
and Masasi HAYAKAWA***

(Received May 30, 1997)

We observed whistlers through simultaneous measurements at very low latitudes in south China (Zhanjiang, Guilin, and Wuchang) in 1988. During time, many whistlers we observed between UT 14:00 to UT 18:00.

It has already been indicated that at nighttime, very low latitude whistlers are attributed to ducted propagation. However, three-dimensional ray tracing computation shows the possibility of non-ducted propagation. However, three-dimensional ray tracing which uses constant ionosphere slope parameters was observed throughout the nighttime hours.

In this paper, calculations were made using parameters of relativity at the time; electron density data was obtained from NSSDC.

Keywords : Whistler, Ray Tracing, Slope of Ionosphere

1. まえがき

雷放電で発生する電磁波の一部が概ね地球の磁力線に沿って反対半球に伝搬するVLF帯の電磁波をホイ斯拉と言う¹⁾。電離層、磁気圏内を伝搬するホイ斯拉の周波数を[Hz]とすれば、伝搬時間[s]は次式で与えられる。

$$t = \frac{D}{\sqrt{f}} \quad (1)$$

ここで、 $D[s^{1/2}]$ はホイ斯拉の分散値と呼ばれ伝搬通路におけるプラズマ周波数を、電子ジャイロ周波数を f_H 、光速を c とすれば次式で与えられる。

$$D = \frac{1}{2c} \int_{path} \frac{f_p}{\sqrt{f_H}} ds \quad (2)$$

このホイ斯拉の伝搬には主として、2通りの伝搬形態が考えられている¹⁾。その1つは地球磁力線に沿って生成される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であり²⁾、他の1つは電子密度の異なる層をスネルの法則 (Snell's Law) に従って伝搬するノンダクト (Nonduct) 伝搬である³⁾。ホイ斯拉の観測では同一伝搬路を往復するエコートレインホイ斯拉が検出されることより、一般にはホイ斯拉の伝搬形態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、超低緯度では磁力線と電離層のなす角が小さくなり、ホイ斯拉が電離層を下降透過するためには周囲電子密度に対するダクト内の電子密度の濃さを表すエンハンスメントファクタ (Enhancement factor) が数100%にも達し、非現実的なものとなってしまう⁶⁾⁷⁾。このため、超低緯度ホイ斯拉の伝搬形態には多くの議論がある。

地磁気緯度が20°以下の超低緯度におけるパイオニア

*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)

的解析は1979年に恩藤らによってなされ、エコートレーンホイスラの観測や、電離層下降透過点の広がり観測地点の天頂に集中していることより、ダクト伝搬であるとした⁸⁾。また、我々も1988年1月中国超低緯度における3観測地点 Wuchang (地磁気緯度19.4°N), Guilin (同14.1°N), Zhanjiang (同10.0°N) で行った多点同時観測の結果、安定したホイスラ電離層下降透過点の存在や下降透過点に周波数依存性がないこと、かつまた多くのエコートレーンホイスラが観測されたことよりダクト伝搬であるとした⁹⁾。その後、我々が行ったノンダクト伝搬の2次元(緯度, 高度)レイトレーシングにおいても2.5kHz以下の周波数帯域ではホイスラが電離層を下降透過できないこと、電離層下降透過点の周波数依存性が明確に見られることなど、観測事実との相違より理論的にもダクト伝搬であるとした¹⁰⁾。しかしながら、このレイトレーシングはダイポール磁場モデルであり、このような超低緯度ではダイポール磁場モデルと現実の地球磁力線(国際基準磁力線(IGRF))との違いが大きく、より現実的な磁力線と電子密度プロファイルに基づくレイトレーシングが必要であることを指摘している。かつまた、数100%にも達するエンハンスメントファクタは今日まで全く観測されておらず、頻繁に観測される超低緯度ホイスラの全てがダクト伝搬であると決定づけるにはためらいがある^{11)~14)}。しかし、超低緯度で観測されるエコートレーンホイスラの存在はダクト伝搬を裏付ける一番の論拠となっている。

そこで、1990年のIGRF磁場モデルと超低緯度における電子密度プロファイルを用い、3次元(緯度, 経度, 高度)レイトレーシングで超低緯度ホイスラの伝搬解析を行えば、ノンダクト伝搬であってもエコートレーンホイスラが生成される可能性を報告した²⁰⁾。しかし、緯度, 経度方向の傾きを示すパラメータを一定の値でのみ計算を行った。今回は、特定の1地点から最大3度の円錐角を考慮して打ち上げた場合、電離層の傾きを変化させることで、ホイスラの透過する地点および入射角度が変化について検討した。

2. 超低緯度における夜間電離層モデル

超低緯度における電離層、磁気圏の電子密度分布は一般に次のように与えられる¹⁵⁾。

$$N_e(r, \theta, \phi) = N_{DE}(r) \times N_I(r) \times N_\theta(r, \theta) \times N_L(\phi) \quad (3)$$

ここで、 r [km]は地球の中心からの距離、 θ [°]は地磁気余緯度[90°-地磁気緯度]、 ϕ [°]は地理経度で、 $N_{DE}(r)$ はAngeramiとThomas¹⁶⁾による拡散平衡モデル、 $N_I(r)$ は木村¹⁷⁾による下部電離層の修正係数、 $N_\theta(r, \theta)$ はSingh¹⁸⁾による緯度方向の電子密度の傾き、 $N_L(\phi)$

はZhou¹⁵⁾による経度方向の電子密度の傾きを表す。超低緯度におけるホイスラの発生は通常夜間のみ観測されるため、1978年から1980年におけるISS-bで得られた冬季夜間のパラメータ¹⁹⁾を基礎にし、A~Fのモデルにした。3次元レイトレーシングでは、最も電離層を下降透過しやすかったAモデルを使用し、基準高度 $R_{base}=500$ kmにおける各パラメータを、電子温度 $T_e=1000.0$ [K]、電子密度 $N_{rbase}=40000.0$ [cm⁻³]、および、 $H^+=0.0016$ 、 $He^+=0.0196$ 、 $O^+=0.9788$ と定めた²⁰⁾。また、下部電離層の修正係数は電離層下端高度を90kmとした。

緯度方向の電子密度の傾きは次式で示される^{15), 18)}。C(r)は高度 r における電子密度の分布を決定するパラメータで、 $\alpha, \sin\theta_0$ はSingh¹⁸⁾によってモデル化された緯度方向の電子密度の傾きを示すパラメータである。また、Zhouら¹⁵⁾が用いたと同様に $\alpha=15$ とし、Zhanjiangの地磁気緯度が10°であることより $\sin\theta_0=0.985$ を使用した。また、C(r)は高度に対するパラメータである。

$$N_\theta = 1 + C(r) \exp\{\alpha(\sin\theta - \sin\theta_0)\} \quad (4)$$

経度方向の電子密度の傾きは次式で示される¹⁵⁾。

$$N_L = 1.0 + LG \frac{\pi}{180} \times (\phi - \phi_0) \quad (5)$$

LGは経度方向の電子密度の傾きを示すパラメータで、 ϕ_0 は基準地理経度を示す。ここでは中国で行った地方時22時から02時の夜間観測を対象にしているため、かつまた観測地点が経度110°E近傍であるため、本論文では $\phi_0=110^\circ$ とし、LGはNSSDC(National Space Science Data Center)のデータより $LG=-0.2$ を用いた。また、北半球で観察されるホイスラを対象としているため各パラメータの設定は北半球をモデルとし、波源の打上げは南半球で行なっている。

3. レイトレーシングの計算

3.1 3次元レイトレーシング 従来のレイトレーシングでは、ホイスラの波源である雷放電の電磁波は電離層における屈折率が大きいこと、特定高度で鉛直方向に上昇透過させる場合が一般的である。そのため、特定地点において、ただ1つの鉛直打ち上げのみを考慮していたため、反対半球の電離層には透過するか全反射するかの1波のみしか存在しなかった。しかし、厳密には電離層を透過する場合は鉛直のみでなく、スネルの法則に従って極わずかな角度も存在する。我々が用いた、電離層下端を90kmとした図1の電子密度プロファイルでは電離層高度120kmにおける屈折率は30~50程度である。そこで、ここでは電離層高度120kmにおいて最大3°の円錐角を考慮して、緯度, 経度方向に角度を傾けて打ち上げを行った。これによって、様々な角度で南半球から打ち

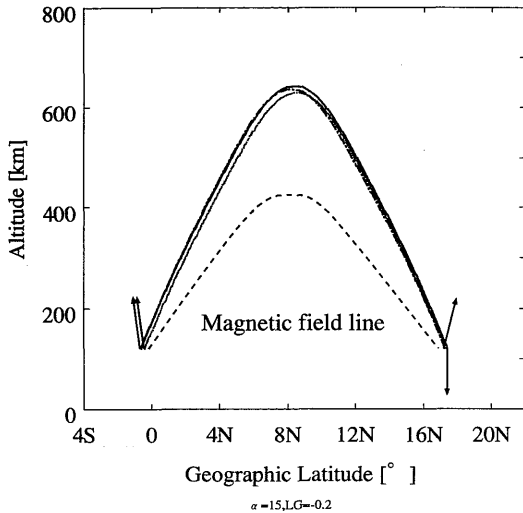


図1 電離層によるエコートレインホイスラ

上げるため、ホイスラ波が北半球の様々な地点に様々な角度で電離層に到来した。よって、特定した地点には多数のホイスラ波が存在し、その波の一部は最大透過角度以内で電離層を下降透過し、他の波は電離層で全反射し、再び磁気圏へ伝搬した。

このことをふまえて、1990年IGRF磁場モデルと超低緯度における電子密度プロファイルを用い、3次元レイトレーシングで超低緯度ホイスラの伝搬解析を行なった。

表1 1日の電離層の傾きの変化 (地磁気緯度 12.4°S, 地理経度 110.3°E)

UT (LT)	α	LG	UT (LT)	α	LG
0 (8)	- 4.80	2.93	12 (20)	3.90	- 0.19
1 (9)	- 3.09	1.01	13 (21)	8.13	- 0.08
2 (10)	- 2.78	0.56	14 (22)	6.24	0.02
3 (11)	- 2.39	0.31	15 (23)	8.45	0.04
4 (12)	- 2.24	0.13	16 (0)	8.50	0.06
5 (13)	- 2.19	- 0.15	17 (1)	8.50	0.08
6 (14)	- 2.30	- 0.22	18 (2)	8.48	0.10
7 (15)	- 2.63	- 0.44	19 (3)	8.41	0.15
8 (16)	- 3.49	- 0.76	20 (4)	6.20	0.18
9 (17)	3.28	- 2.08	21 (5)	3.98	0.20
10 (18)	-17.06	- 3.86	22 (6)	-41.59	10.01
11 (19)	-42.95	-10.11	23 (7)	-26.69	5.87

解析の結果、図1のように大地で反射して生成される場合でも、電離層で反射して生成される場合でもエコートレインホイスラが生成され、ノンダクト伝搬であってもエコートレインホイスラが存在していることを明らかにした²⁰⁾。しかし、実際の観測では、LT22:00~LT2:00 (UT14:00~UT18:00)の間に最も多くホイスラが観測されたが、我々が行った3次元のレイトレーシングによる理論計算では夜間ならばいつでもホイスラが観測されるという結果になった。その原因として考えられるのは、表1のように実際は電離層の傾きを示す α とLGが時間によって常に変化しているのに対して、我々が理論計算において使用した α とLGはそれぞれ15と-0.2と一定であったためと考えられる。そこで、電離層の傾きを示す α とLGをNSSDCのデータにしたがって変化させたときの、ホイスラの下降透過地点および入射角度の相互関係について考察する。

3. 2 Aモデルを使用した解析

図2に、NSSDC(National Space Science Data Center)のデータより入手した1988年1月1日中国超低緯度における観測地点Zhanjiang (地磁気緯度10.0°N, 経度110°E)に最もホイスラが下降透過した打ち上げ地点 (地磁気緯度12.4°S, 経度110.3°E)の高度120kmにおける電子密度、および、電離層の傾きを示すパラメータである α , LGの1日の変化を示す。電子密度が大きく変化している部分は、その時間帯が昼間であることを示し、電子密度が一定に見える部分は夜間であることを示す。但し、

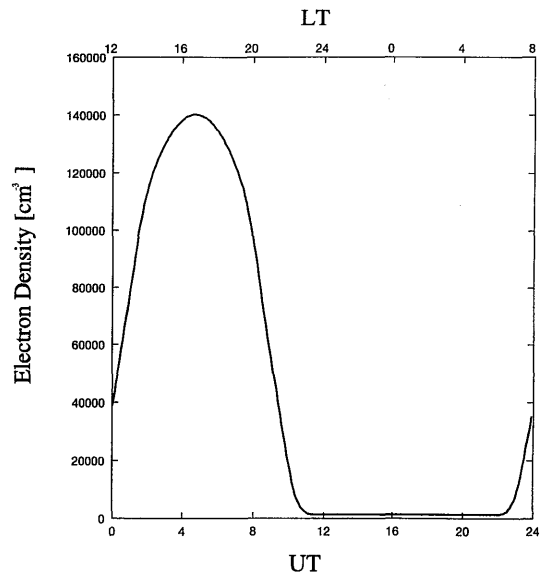


図2 1日の電離密度の変化 (地磁気緯度 12.4°S, 地理経度 110.3°E)

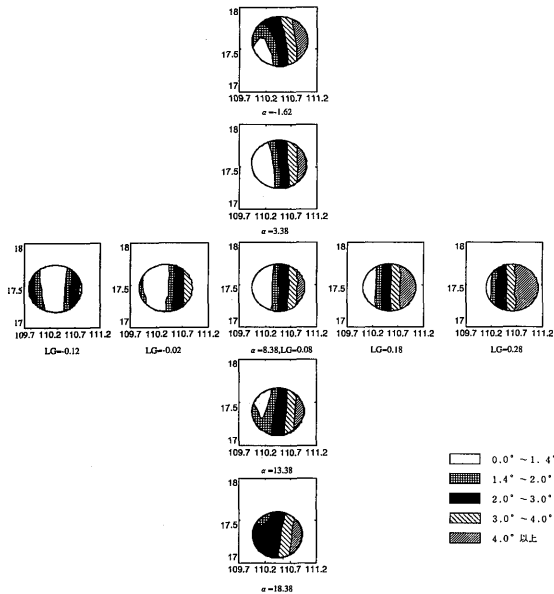


図3 α と LG を変化させたときの到達地点および入射角度
(地磁気緯度 12.4°S , 地理経度 110.3°E)

図2では一定に見えても実際には極わずかに変化している。

図3に同一地点(地磁気緯度 12.4°S , 経度 110.3°E)から高度 120km において, 経度, 緯度方向の傾きである α と LG を変化させて, 最大 3° の円錐角で打ち上げたときの電離層下降透過地点とその入射角度を示す。円内の白い部分は高度 120km における屈折率が $30\sim 50$ 程度であることより, 入射角度 1.4° 以下で電離層を下降透過したことを示し, 1.4 度, 2.0 度, 3.0 度, 4.0 度を境として模様分けし, その他の部分は電離層で全反射したことを示す。図の中心の $\alpha=8.38$, $LG=0.08$ は, NSSDCから得られたデータより求めた打ち上げ地点上空の電離層の傾きを示すパラメータを夜間について平均したものである。この値を中心にして, 緯度方向の傾き α を縦方向に変化させて縦方向に並べ, 経度方向の傾き LG を横方向に変化させて横方向に並べた。この図を見ると, ある特定の地点から打ち上げた場合, α と LG を変化させると電離層を下降透過できる地点が変化し, 中には全く下降透過しなくなる場合も存在することがわかる。したがって, α および LG を変化させることによって電離層を下降透過できる地点が変化していることから, 表1にしたがって時間に対して α および LG を変化させれば, ホイスラの透過可能な時間帯が限られる可能性があると考えられる。しかし, 図4からもわかるように, 打ち上げ地点における夜間(約UT12:00~UT22:00)の α および LG はほとんど変化してない。よって, Aモデルでは, NSSDCから得たデータをもとに作った電離層の傾きを示す α および LG のパラメータを使用しても実際にホイスラが観測される時

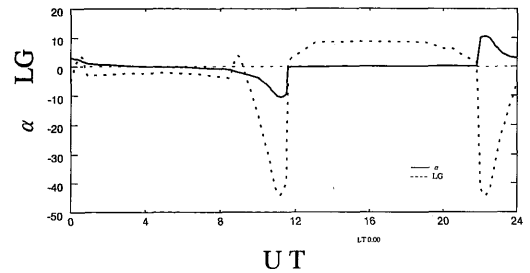


図4 1日の α と LG の変化 (地磁気緯度 12.4°S , 地理経度 110.3°E)

間帯よりも長時間にわたりホイスラが生成されることになった。

3.3 Fモデルを使用した解析

Aモデルは, 非常に電離層を下降透過しやすいパラメータであるので, 特定の α と LG のみ電離層を下降透過させる場合では適していない。そこで, 電離層を下降透過しにくいタイプのパラメータであるFモデルを使用して解析を行った。Fモデルでは, 基準高度 $R_{\text{base}}=500\text{km}$ における各パラメータを電子温度 $T_e=1000.0[\text{K}]$, 電子密度 $N_{\text{rbase}}=80000.0[\text{cm}^{-3}]$, および, $\text{H}^+=0.0196$, $\text{He}^+=0.0548$, $\text{O}^+=0.9268$ と定めた²⁰⁾。

図5は, 同一地点(地磁気緯度 13.0°S , 地理経度 110.3°E)から縦方向に α , 横方向に LG を変えて, 高度 120km より打ち上げたものである。図の中心の $\alpha=8.55$, $LG=0.08$ は, NSSDCから得られたデータより求めた打ち上

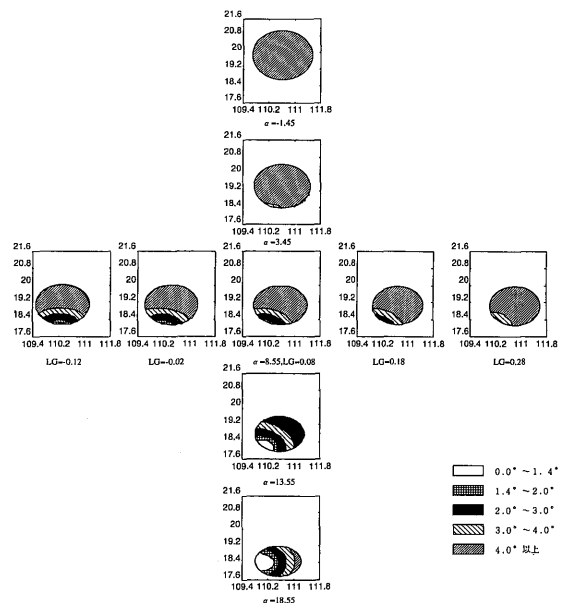


図5 α と LG を変化させたときの到達地点および入射角度
(地磁気緯度 13.0°S , 地理経度 110.3°E)

げ地点上空の電離層の傾きを示すパラメータを夜間について平均したものである。この図から、Fモデルではほとんど電離層を下降透過しないことがわかる。しかし、LGを変化させた場合は、電離層を下降透過する部分にほとんど影響がないが、 α を大きくしていくと、徐々に電離層を下降透過する部分が増えてくることがわかる。したがって、入射角度に影響を及ぼす α について検討してみる。

図6は、打ち上げ地点(地磁気緯度13.0°S, 地理経度110.3°E)上空の電離層の傾き α , LGの変化を示したものである。この図から、夜間における α の変化のみを抜き出し、図7に示す。図7を見ると、上に凸の形になっている。したがって、 $\alpha=8$ 以上でのみ電離層を下降透過しないモデルを作成すれば、ホイ斯拉の観測される時間を制限することができる。よって、図5のように α がある値以上しか下降透過しないようなFモデルが超低緯度の電離層モデルに適していると考えられる。

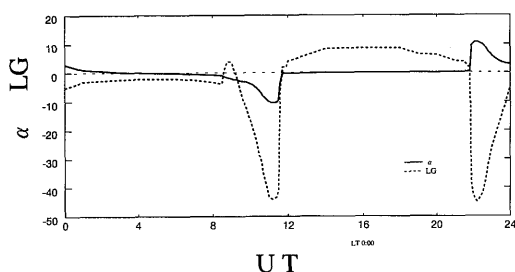


図6 1日の α とLGの変化 (地磁気緯度13.0°S, 地理経度110.3°E)

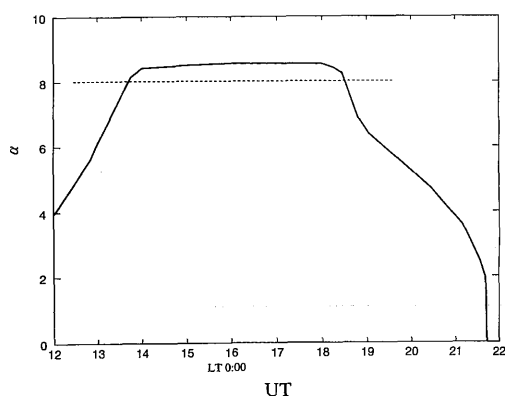


図7 夜間における α の変化 (地磁気緯度13.0°S, 地理経度110.3°E)

4. むすび

地磁気緯度が10°前後の超低緯度で観測されるホイ斯拉がダクト伝搬であるかノンダクト伝搬であるかについては多くの議論がある。ノンダクト伝搬を主張する論拠は超低緯度ではダクト伝搬に必要なエンハンスメントファクタが高緯度とは異なり数100%にも達し、非現実的とさえ考えられることにある。一方、ダクト伝搬を主張する一番の論拠は同一伝搬路を往復して生成されるエコートレインホイ斯拉が観測されることにある。そこで、超低緯度における電子密度モデルとIGRF磁場モデルによる3次元レイトレーシングを用い、ノンダクト伝搬でもエコートレインホイ斯拉の生成が可能であるとした。しかし、電離層の傾きを示すパラメータを一定としたため夜間ならばいつでもホイ斯拉が観測されるという結果になった。そこで、本論文では、電子密度の傾きを与えるパラメータを変化させるとホイ斯拉が下降透過地点および入射角度が変化することを利用して、NSSDCから得たデータをもとに電離層の傾きのパラメータを求め、ホイ斯拉が生成される時間が限定される可能性を示した。

ホイ斯拉波の電離層下降特性は使用する電子密度プロファイル、及び電子密度の緯度方向、経度方向の傾きを与えるパラメータによって大きく依存する。本論文においては、一部のパラメータによってのみ解析したが更により広く、現実的なパラメータを用いる必要があろう。今後、南北で異なる、より現実的な電子密度プロファイルを使用し、電離層下降透過特性を解析したい。

参考文献

- 1) Helliwell R. A.: "Whistlers and Related Ionospheric Phenomena", Stanford Univ. Press, pp. 43-51, 317-327 (1965).
- 2) Smith R. L.: "Propagation characteristics of whistlers trapped in field-aligned columns of enhanced ionization", J. Geophys. Res., 66, pp. 3699-3707 (1961).
- 3) Maeda K. and Kimura I.: "Calculation of the propagation path of whistling atmospherics", J. Atmosph. Terr. Phys., 15, pp. 62-65 (1959).
- 4) Bullough K. and Sagredo J. L.: "VLF goniometer observations at Halley Bay, Antarctica -I. The equipment and the measurement of signal bearing", Planetary Space Science 21, pp. 899-912 (1973).
- 5) Hayakawa M. and Ohtsu J.: "Ducted propagation of low latitude whistlers deduced from the simultaneous observations at multistations", J. Atmosph. Terr. Phys., 35, pp. 1685-1619 (1973).

- 6) Hasegawa M., Hayakawa M. and Ohtsu J.: "On the conditions of duct trapping of low-latitude whistlers", *Ann. Geophys.* 4, pp.317-324 (1978).
- 7) 中村勝義.: "低緯度ダクト出口のホイ斯拉波動法線分布特性", *信学論 (BII)*, J78-B-II, 7, pp. 511-519 (1995).
- 8) 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).
- 9) 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 (BII)*, J73-B-II, 4, pp.182-189 (1990).
- 10) 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 (BII)*, J75-B-II, 5, pp.309-314 (1992).
- 11) Liang B. X., Bao T. and Xu J. S.: "Propagation characteristics of nighttime whistlers in the region of equatorial anomaly", *J. Atmosph. Terr. Phys.*, 47, pp.999-1007 (1985).
- 12) Andrews M. K.: "Non-ducted whistler-mode signals at low latitudes", *J. Atmosph. Terr. Phys.*, 40, pp.429-436 (1978).
- 13) Andrews M. K.: "On whistlers with very small dispersion", *J. Atmosph. Terr. Phys.*, 41, pp. 231-235 (1979).
- 14) Thomson N. R.: "Ray-tracing the paths of very low latitude whistler-mode signals", *J. Atmosph. Terr. Phys.*, 49, pp.321-338 (1987).
- 15) Zhou H. B., Xu J. S. and Hayakawa M.: "On the longitudinal effect in whistler propagation characteristics at low latitudes", *Planet. Space Sci.*, 36, 8, pp.833-839 (1988).
- 16) Angerami J. J. and Thomas J. O.: "Studies of planetary atmospherics, 1. The distribution of ions and electrons in the earth's exosphere", *J. Geophys. Res.*, 69, pp.4537-4560 (1964).
- 17) Kimura I.: "Effects of ions on whistler mode ray tracing", *Radio Sci.*, 1, 3, pp.269-283 (1966).
- 18) Singh B.: "On the ground observation of whistlers at low latitudes", *J. Geophys. Res.*, 81, pp. 2429-2432 (1976).
- 19) 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).
- 20) 西村恭弘, 太田健次, 早川正士: "3次元レイトレーシングによる超低緯度ホイ斯拉", *中部大学工学部紀要*, 31 (1995)