

中緯度ホイ斯拉の伝搬特性

北川 智美*, 太田 健次**, 嶋 直樹***, 早川 正士***, Dowden R. L.****

Propagation Characteristics of Whistlers
at Mid LatitudeTomomi KITAGAWA*, Kenji OTA**, Naoki SHIMA***,
Masashi HAYAKAWA*** and Dowden R. L.****

(Received May 31, 1995)

The ground-based direction finding of mid latitude whistlers carried out at Otago, New Zealand ($L=2.43$) has yielded the exit points of whistlers in the lower ionosphere through field analysis method. Our field analysis direction finding measurement has been applied to multi-path whistlers has penetrated through the ionosphere very close to the station at Otago ($L_{DF}=2.43$). But the L value of this whistler measured by nose extension method ($L_n=2.84$) is larger than the L value at the station of Otago.

This difference between L value of direction finding (L_{DF}) and L value of nose extension method (L_n) has led us to conclude that the duct ends at a height of 3000 km in the ionosphere.

1. まえがき

ホイ斯拉は雷放電で発生する電磁波の一部が地磁気力線に沿って生成される周囲電子密度より濃い (増加の割合をエンハンスメントファクタ (Enhancement factor) と呼ぶ) 電子密度のダクト (Duct) と呼ばれる部分を通して反対半球に到達する VLF 帯の電磁波である⁽¹⁾。極めてエンハンスメントファクタが大きくなる超低緯度を除き⁽²⁾⁽³⁾、高緯度⁽⁴⁾であれ低緯度⁽⁵⁾であれ磁気圏を伝搬するホイ斯拉はダクト伝搬であることは実験的にも理論的にも明らかにされている。しかしながら、ダクトの諸特性 (生成から消滅までの継続時間、ダクトの大きさ、ダクトの間隔、ダクトのエンハンスメントファクタなど)

は僅かな例外⁽⁶⁾を除いて必ずしも明らかではない。また、ダクトの終端が電離層の何処まで届いているかはダクト

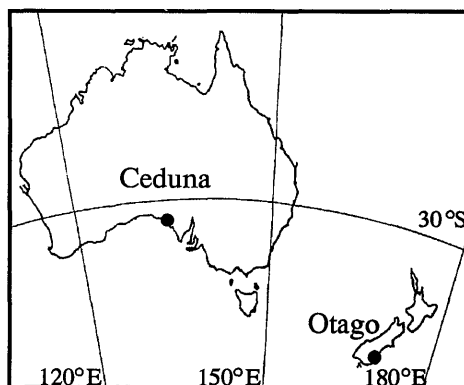


図1 中緯度におけるホイ斯拉の観測地点

*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)

****University of Otago, New Zealand

伝搬の重要な研究課題である。

我々は1989年8月に第1図で示すオーストラリアのセドナ (Ceduna; 地磁気緯度 41.9°S , $L=1.81$) において中緯度ホイスラの夜間観測を行った⁽⁷⁾。この観測で検出されたマルチパス (Multi path) ホイスラを用いて、中緯度におけるダクトの生成と消滅、ダクトの大きさ、形状、及びダクトの間隔などを明らかにした。しかし、この緯度では磁気圏伝搬路を特定できるノーズ (Nose) ホイスラは通常観測されず、特別な手法を用いてノーズ周波数を推定する手段 (ノーズ・イクステンション (Extension) 法) を用いた。この手法でセドナの観測地点に電離層下降透過点を持つホイスラを解析したところ、これらのホイスラはセドナの伝搬経路の頂点距離 (その高度を地球半径で正規化したものを L 値と呼ぶ) の L 値より 0.56 程度大きな値を持つことが分かった。この矛盾を明らかにする新たな観測を1994年8月、第1図に示すニュージーランドのオタゴ (Otago; 地磁気緯度 50.1°S , $L=2.43$) で行った。この観測に基づき、電磁界解析法による到来方向測定、ノーズ・イクステンション法による磁気圏伝搬路の特定、レイ・トレーシング (Ray tracing) による電離層伝搬路の特定を行ったのでその解析結果を報告する。なお、ノーズ・イクステンション法やレイ・トレーシングによる理論計算にダイポール磁場を用いたため、本論文における地磁気緯度及び L 値は全てダイポール近似による計算で示してある。

2. 中緯度におけるホイスラの観測

1994年8月13日から31日までの2週間、ニュージーランドのオタゴにおいて地方時 (L.T. 以後、観測時間は全て地方時で示す) 22時~04時まで連続6時間、VLF帯電磁波の夜間観測を行った。特に8月30日の観測では一群のマルチパスホイスラにノーズホイスラが含まれ、かつまた、その状態が安定して概ね6時間持続していることが分かった。そこで、これらマルチパスホイスラ群を用いて中緯度ホイスラの伝搬特性 (ダクトの径、ダクトの間隔、ダクトの終端高度) について実験的な電磁界解析法、ノーズ・イクステンション法、及び理論的な磁気圏及び電離層内レイ・トレーシング法を用いて解明しようとするものである。

電磁界解析法によるホイスラの到来方向測定 (到来方位 θ 、入射角 i 、及び偏波特性 (u,v)) は垂直アンテナ ($h=10\text{m}$, $C_a=120\text{pF}$) に誘起する垂直電界1成分 (E_z) に対する直交ループアンテナ ($S=80\text{m}^2$, $L_a=265\mu\text{H}$, $r_a=1\Omega$, 2回巻き) に誘起する水平磁界2成分 (B_x , B_y) との振幅比と位相差を知ることにより求められる⁽⁸⁾⁽⁹⁾。この観測系と電磁界解析法については論文 (8), (9) を参照されたい。

3. ノーズ・イクステンション法

ホイスラの観測周波数帯域は、低周波成分では50Hzの商用電力高調波周波数を除き、かつまた高周波成分ではオメガ局やVLF局を除いた10kHz以下の周波数帯域で観測される場合が多い。また、この周波数帯域での観測は一般の民生用のデジタル録音機器を使用し極めて容易に観測することができる⁽⁹⁾。本邦の様な低緯度ではホイスラの周波数が伝搬路での電子ジャイロ周波数に比べ著しく小さいため、ノーズ周波数が100kHz以上にもなり、観測周波数帯域ではノーズホイスラは観測されない⁽¹⁾。しかし、高緯度ではノーズ周波数が急速に低下し、10kHz以下となり、通常の周波数スペクトル (周波数-時間) で以後、ソナグラムと呼ぶ) で容易に知ることができる。他方、本論文で取り扱うような中緯度では一般にノーズ周波数が数10kHz程度であり、ホイスラの分散曲線がエッカーズレイ (Eckersley) の法則で定まる曲線からずれるノーズ効果のみを検出することができる。このノーズ効果をソナグラムより読み取り、スペクトル上に現れないノーズ周波数を推定する方法が必要となる。この手法をノーズ・イクステンション法と言う⁽¹⁰⁾。本論文では我々の開発したデジタルソナグラムを用い⁽¹¹⁾、ホイスラスペクトル上の多数の点 (周波数-時間) を自動的に読み取り⁽¹²⁾、このデータを Tarcsai の開発したノーズ・イクステンション法に適用させた。デジタルソナグラフと Tarcsai の手法は文献 (10), (11), (12) を参照されたい。この手法を用い、中緯度で観測されるホイスラのノーズ周波数を求め、当該ホイスラの伝搬経路の頂点 (L 値) を知り、経路頂点 (赤道面) での電子密度を評価することができる。

4. ホイスラの分散値と地磁気緯度

電磁界解析法によるホイスラの伝搬特性の解析手法をピュアートーンタイプ (Pure tone type) の昼間ホイスラを用いて分かり易く説明しよう。第2図は8月31日14時34分にオタゴで観測されたホイスラのソナグラムで、時間に対する周波数の広がり比較的少ないピュアートーンホイスラである。先行空電が単一であることよりマルチパスホイスラである。先頭のホイスラをA、後方のホイスラをBとする。ホイスラAは分散値が $55 (\text{s}^{1/2})$ で、ホイスラBは $58 (\text{s}^{1/2})$ である。ホイスラBはホイスラAに比べ強く到来していることがソナグラムより明らかである。同一先行空電より生成されたマルチパスホイスラであるから、ホイスラBはAに比べ、より観測地点近傍に電離層下降透過点を持つことが推定される。

第3図は電磁界解析法で求めた25Hz間隔で集計したホイスラBの (a) B_x , B_y の位相差, (b) 入射角 i ,

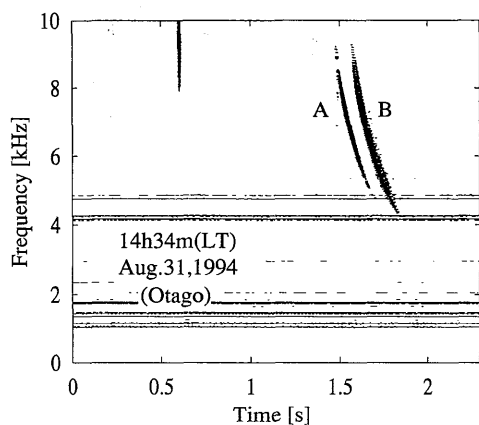
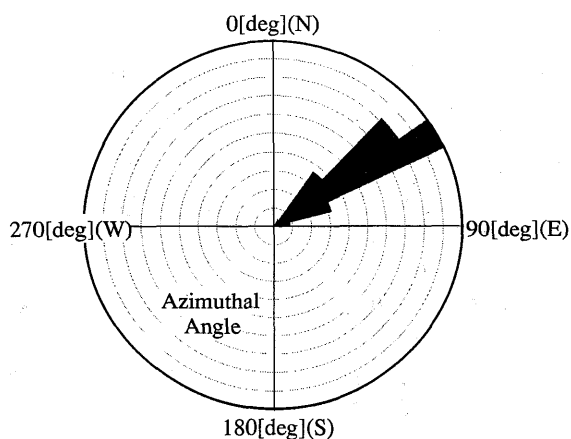
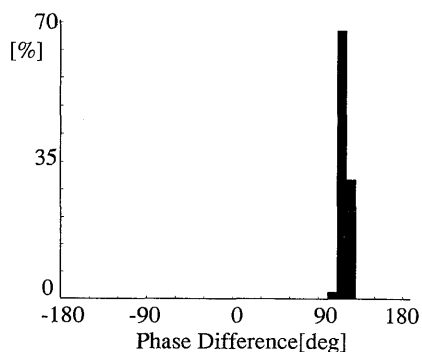


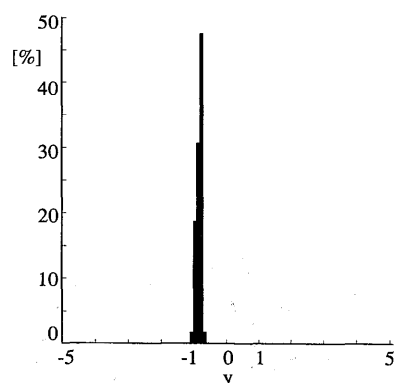
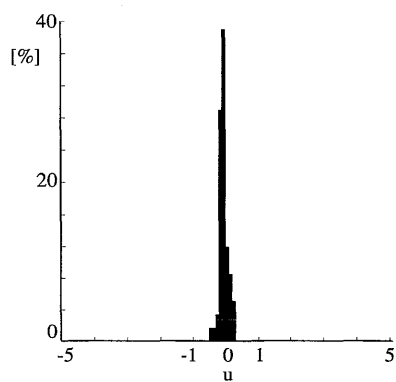
図2 中緯度における昼間ホイスラ



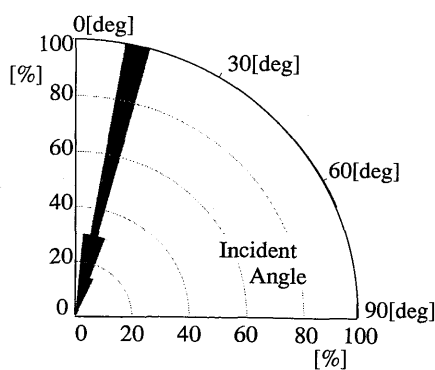
(c) 方位角 θ



(a) 位相差



(d) 偏波特性 (u, v)



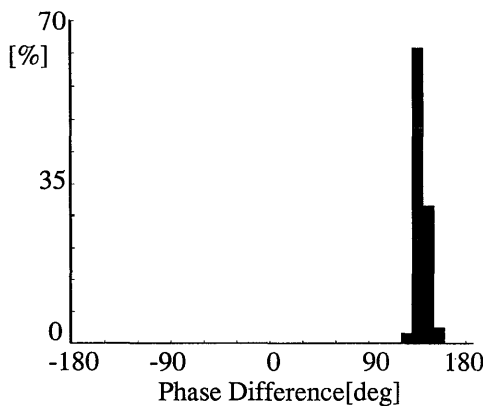
(b) 入射角 i

図3 昼間ホイスラBの伝搬特性

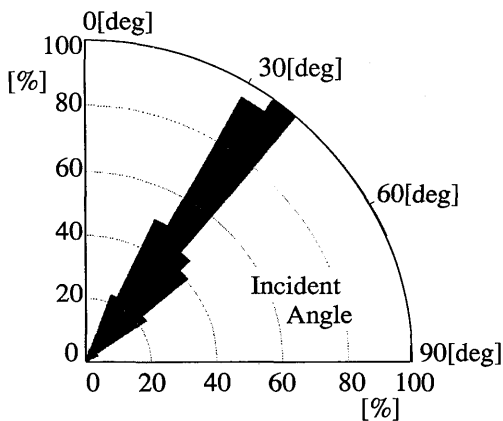
(c) 方位角 θ , 及び (d) 偏波特性 (u, v) の割合を長さで示したものである。(d) 図の (u, v) は概ね $u=0$,

$v=-1$ に中心があり, かつまた(a)図の位相差の中心が 105° であることから, 観測地点に右旋性円偏波でほぼ天頂より到来していることが推定される⁽¹³⁾. 観測地点から電離層下降透過点を示す(b)図の入射角 i は 12.5° にその中心がある。これらのことから分散値 $58 \text{ (s}^{1/2}\text{)}$ のホイスラ B は電離層を下降透過し, ほぼ真下の観測地点へ到来したことを示している。また, 同様に第4図はホイスラ A の (a) B_x , B_y の位相差, (b) 入射角 i , (c) 方位角 θ , 及び (d) 偏波特性 (u , v) である。位相差 (a) は 125° が中心で, (u , v) は概ね $u=0.7$, $v=-1.2$ に中心があり, 右旋性楕円偏波で到来していることが分かる⁽¹³⁾。また, 第3図の各特性に比べ広く分布している。これらの特性はホイスラ B に比べ遠方より到来していることを示している⁽⁷⁾。一方, (b)の入射角 i は 35° に中心があり, かつまたホイスラ B に比べ広い角度に分布している。

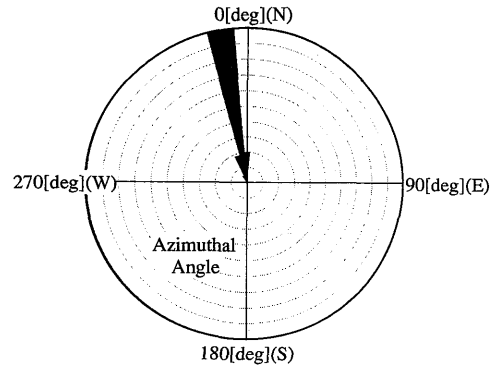
Shimakura らは北海道の母子里 (地磁気緯度 34.5°)



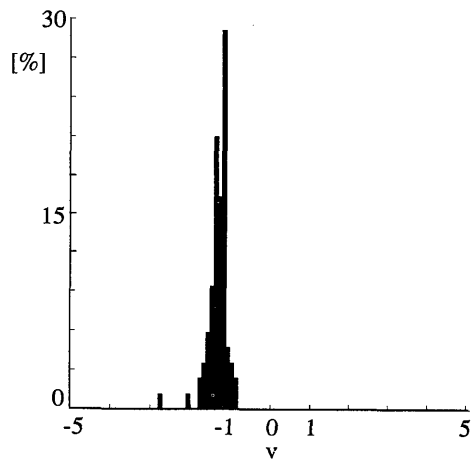
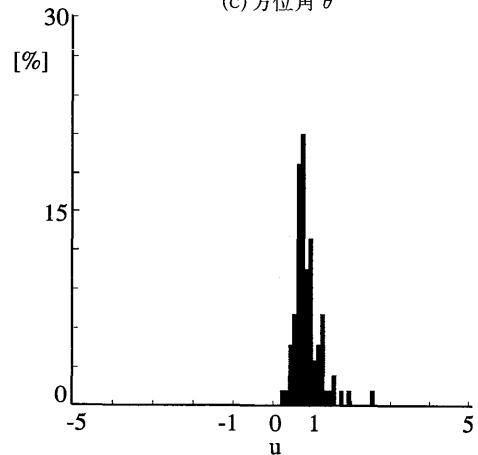
(a) 位相差



(b) 入射角 i



(c) 方位角 θ



(d) 偏波特性 (u , v)

図4 昼間ホイスラ A の伝搬特性

で観測されるホイスラより, 分散値 $D \text{ (s}^{1/2}\text{)}$ と地磁気緯度 $\Lambda \text{ (deg)}$, 及び B_x , B_y の位相差には一定の関係式が成り立つことを見いだした⁽¹⁴⁾。我々は既に, セドナで観測されるホイスラにこの関係式を適用し, 伝搬距離の

推定に用いた⁽⁷⁾。ここで、地磁気緯度 50.1° のオタゴで観測されたホイスラ B の分散値が $58 \text{ (s}^{1/2}\text{)}$ であることより次式が求められる。

$$D \text{ (s}^{1/2}\text{)} = 1.22 \text{ (}\Lambda \text{ (deg)} - 2.96) \quad (1)$$

(1) 式より、分散値 $55 \text{ (s}^{1/2}\text{)}$ のホイスラ A は地磁気緯度が 48° の地点で電離層を下降透過したことになる。しかしながら、電磁界解析法で求められたホイスラ A は電離層よりオタゴの観測地点へ入射角 i が 35° で到来している。もし、地磁気緯度 48° の地点で電離層を下降透過しているのであれば、概ね 250km ほど高緯度側にあるオタゴへは電離層高度を 80km と仮定した場合 70° 程度の入射角で到来しなければならない。しかしながら、電磁界解析法で求めた入射角が 35° であることはホイスラ A は電離層下降透過点より観測地点へ直接波として

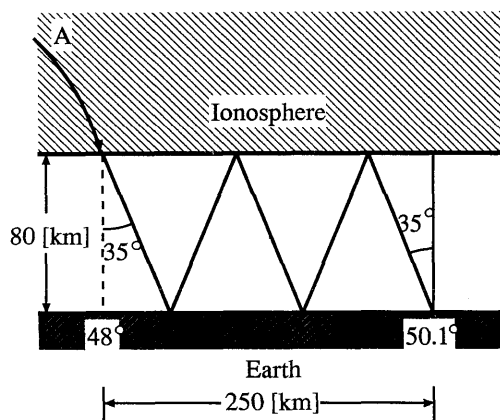


図5 多重反射によるホイスラ A の伝搬距離推定

でなく、大地と電離層間の多重反射として到来したことを意味している⁽¹⁵⁾。この解釈を説明したのが第5図である。図より、地磁気緯度 48° の地点へ入射角 35° で電離層を下降透過したホイスラ A は大地—電離層間を2回反射してオタゴの観測地点に到来したことになる。

5. 解析結果

前章においては、ホイスラ分散値、 B_x 、 B_y の位相差、及び観測地点の地磁気緯度よりホイスラの伝搬距離を推定した。しかし、1 観測地点で遠方に電離層下降透過点を持つホイスラの伝搬路をより正確に求めるにはノーズ周波数を知る必要がある。ソナグラムから直接ノーズ周波数を読みとることが不可能な場合はホイスラのノーズ効果よりノーズ・イクステンション法で求められることは既に述べた。本章においては、ノーズ周波数より、電離層の下降透過点を検討しよう。

第6図は8月31日01時04分に観測されたマルチパスホイスラのソナグラムである。これら一群のホイスラは同一先行空電より生成されており先頭より A~H までの符号を付けるものとする。A から C までは通常のホイスラであるが、D 以降はノーズホイスラとなっている。これらのホイスラはそれぞれ異なる通路を伝搬したものであるが、6 時間にわたる全観測時間中はほぼ同一モードで観測されており、明らかにダクト伝搬であることを示している。電磁界解析法で求めた入射角 i と方位角 θ を電離層高度 100km に投影したホイスラ B の電離層下降透過点と偏波パラメータをそれぞれ第7図(a), (b) に示す。第3図(d) に示した昼間ホイスラの偏波パラメータに比べ幅広く分布しているがこれはホイスラ自体が中緯度ホイスラの特徴である時間に対する周波数の広がり比較的多いディヒューズ(Diffuse)タイプであり、強度も弱いことに起因している⁽⁷⁾。しかし、概ね電離層

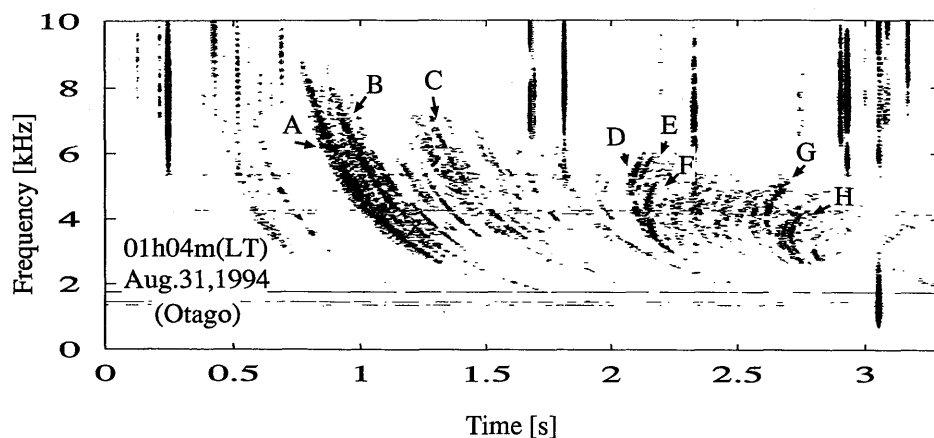
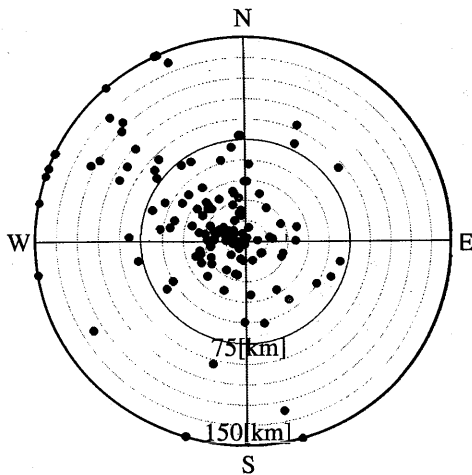
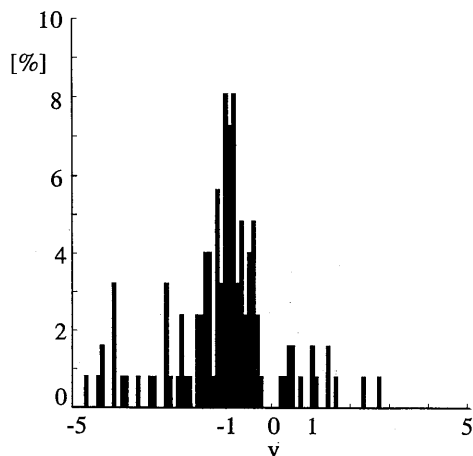
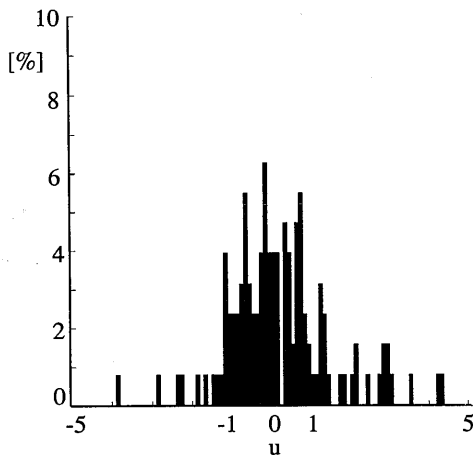


図6 中緯度における夜間ホイスラ



(a) 高度100kmでの電離層下降透過点



(b) 偏波特性 (u, v)

図7 夜間ホイスラ B の伝搬特性

下降透過点は観測地点真上の半径 100~150km の範囲に分布している。また、偏波パラメータは $u=0$, $v=-1$ に中心がある。よって、ホイスラ B が観測地点上空より概ね半径 150km 程度の広がりをもって到来しているがその中心は半径 75km 程度の円内に存在していることが分かる。ホイスラダクトが磁気圏及び電離層のどの高度で終わっているにせよ電離層下端面における広がりの半径が 75km と言うことはダクトの径は 150km 程度であることを意味し、低緯度におけるホイスラダクトの 2~3 倍程度であると推定される⁽⁶⁾。

一方、このホイスラ B と同一ダクトを伝搬したホイスラで最も強く観測された 01~02 時の時間帯から 10 個を選びノーズ・イクステンション法で磁気圏内伝搬路の L 値 (L_n) 求め (2) 式を得た。

$$L_n = 2.84 \pm 0.06 \quad (2)$$

ホイスラ B は観測地点であるオタゴ上空に電離層下降透過点を持つことはすでに明らかにした。つまり、電磁界解析法で求めたオタゴの観測点を通る L 値 ($L = 1/\cos^2 \phi_0$ (ϕ_0 : 地上磁気緯度)) を L_{DF} とすれば, (3) となる。

$$L_{DF} = 2.43 \quad (3)$$

本来、同一ホイスラを解析したので、ノーズ・イクステンション法で磁気圏内伝搬路より求めた L 値 (L_n) と電磁界解析法で地上磁気緯度より求めた L 値 (L_{DF}) は同一値となるはずであるが異なった L 値となった。

6. 観測結果に対する理論的考慮と中緯度ホイスラの伝搬特性

電磁界解析法によって、ホイスラ B の到来方向 (方位角 θ , 入射角 i) 及び偏波パラメータ (u , v) を求めた。その結果、ホイスラの到来した地上磁気緯度から求めた L 値 (L_{DF}) は $L_{DF} = 2.43$ であった。また、ホイスラ B を Tarcsai の開発したノーズ・イクステンション法を用いて磁気圏内伝搬路から求めた L 値 (L_n) は $L_n = 2.84 \pm 0.06$ であった。つまり、ノーズ・イクステンション法で求めた L 値 (L_n) の方が地上磁気緯度から求めた L 値 (L_{DF}) に比べ概ね 0.41 ほど大きくなった。よって、次式の関係式が成立する。

$$L_{DF} = L_n - 0.41 \quad (4)$$

L_{DF} と L_n との違いについて検討しよう。電磁界解析法で求められるホイスラの到来方向測定は低緯度^{(16) (17)}

及び超低緯度⁽¹⁸⁾において用いられており、その解析結果は他の方式においても支持されている⁽¹⁹⁾。中緯度においても電磁界解析法の有効性は既に示した⁽⁷⁾。よって、電磁界解析法で求めた L 値 (L_{DF}) に特別な誤差が含まれるとは考えられない。一方、Tarcsai の開発したノーズ・イクステンション法は中緯度ホイ斯拉で多く用いられており、その成果も高い評価を受けている⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾。我々の開発したデジタルソナグラムとの連動で特定の誤差が発生した可能性も検討した。つまり、ノーズ周波数が実際にソナグラムで観測できるホイ斯拉 D~H を用いて、ノーズ周波数以下のスペクトルデータ (周波数-時間) を用いてノーズ・イクステンション法でノーズ周波数を推定した。しかし、ホイ斯拉のスペクトルから直接求めたノーズ周波数とノーズ・イクステンション法で求めたノーズ周波数には有為な差は全く見られなかった。

Strangeways らは Bullough らの開発したゴニオメータ方位測定⁽²¹⁾と Tarcsai とは異なるノーズ・イクステンション法により、 $L_{DF}=L_n-0.6$ という結果を $3 < L < 4$ の範囲において得ていた⁽²²⁾。我々は 1989 年オーストラリアのセドナの $L=1.8$ という特定の場所ではあるが、ほぼ同一の結果を得ていた。しかし、我々が中緯度で行った初めての観測であり、ホイ斯拉の観測周波数が 7kHz 以下で⁽⁷⁾、かつまたノーズホイ斯拉が観測されなかったため、十分な検討が行えなかった。しかし、今回、オタゴにおける観測で (4) 式の関係を求めることができた。よって、 $L_{DF}=L_n - (0.4 \sim 0.6)$ はセドナの $L=1.8$ 、オタゴの $L=2.4$ 、及び Strangeways らの求めた $3 < L < 4$ の範囲、つまり $2 < L < 4$ の広い中緯度から高緯度帯に成立しているものと考えられ、中緯度ホイ斯拉の普遍的な特性であると結論できよう。

従って、電磁界解析法によって地上磁気緯度から求めた L 値 (L_{DF}) と Tarcsai の開発したノーズ・イクステンション法によって磁気圏内伝搬路から求めた L 値 (L_n) はそれぞれ正しい値であることになる。この相矛盾する L 値を合理的に解釈する方法を示そう。

- (1) ホイ斯拉 B は L 値 (L_n) が $L_n=2.84 \pm 0.06$ の磁気圏内伝搬路をダクト伝搬している。
- (2) ホイ斯拉 B は L 値 (L_{DF}) が $L_{DF}=2.43$ の地点に電離層を下降透過している。

つまり、この (1)、(2) を同時に満足する伝搬は (1) の L 値をダクト伝搬したが途中でダクトから離脱し、ノンダクト伝搬となり、(2) の地点に下降透過することである。まず (2) より、ホイ斯拉 B はオタゴ上空の電離層にて鉛直の回り極めて狭い透過円錐を透過したものである。従って、相反性を考慮して、オタゴ上空の電離層 (高度=100km) から、鉛直方向の初期波面法線方向に

て電波を打ち上げたときのノンダクト伝搬路を第 8 図に示す。磁場モデルはダイポールモデルで、電子密度分布は拡散平衡モデルを用い、代表的な中緯度におけるパラメータを設定した。このモデルはノーズ・イクステンション法によって求めた L_n (赤道面での電子密度) の実測電子密度分布のデータに合致していることは確認されている。また、レイ・トレーシングに使用した周波数は 5kHz である。ホイ斯拉は上昇するにつれ、大きな L 値の方向、即ち磁力線より外側へと伝搬して行くことが分かる。図より概ね高度 3000km にてレイは $L_n=2.84$ の磁力線と遭遇することになる。このレイ・トレーシングにより、オタゴにて電離層を下降透過したホイ斯拉 B は高度 3000km 前後に、ダクトを抜け出しているのではないかと考えることができる。また、このとき磁力線とレイとのなす角は 15° 程度であり、ダクトの捕捉条件⁽¹⁾によるエンハンスメントファクタは 5% 以内と言うことになる。

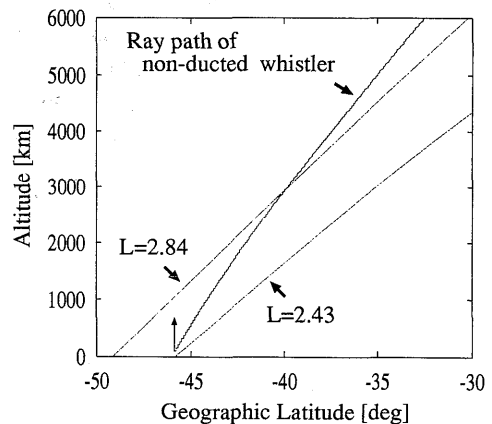


図 8 中緯度におけるダクトの終端高度推定

7. 中緯度におけるホイ斯拉ダクトの間隔とその継続時間

第 6 図で示したマルチパスホイ斯拉はそれぞれ異なるダクトを伝搬しており、各ホイ斯拉のノーズ周波数を知ることにより中緯度ホイ斯拉のダクト間隔を推定できる。A から C までのホイ斯拉にノーズ・イクステンション法でノーズ周波数を求めた。また、ホイ斯拉 D から H はソナグラムのスペクトルから直接求めた。表 1 にその結果を示す。またこの表では、各ホイ斯拉がどの電離層高度でダクトを離脱し、どのような角度でノンダクト伝搬したかを全ては特定できないため、ダクトは電離層下端まで到達しているものとして計算してある。

ソナグラムでノーズ効果のみを示す中緯度ホイ斯拉である A~C については緯度方向に AB 間が 115km、BC 間が 175km となっている。この緯度方向の距離と、

表1 マルチパスホイ斯拉の伝搬 L 値と地磁気緯度

Whistler	A	B	C	D	E	F	G	H
L value	2.684	2.830	3.082	4.090	4.112	4.228	4.322	4.528
Geomagnetic Latitude [deg]	52.38	53.53	55.28	60.37	60.45	60.90	61.25	61.97
Distance from Otago [km]	230	0	270	900	1100	2200	900	1100

方位角から求められる角度により各ダクトの距離は AB 間が 230km, BC 間が 272km となった。しかし, AB 間には少なくとも 1 本のホイ斯拉が, そして BC 間には 2 本のホイ斯拉がソナグラムから読みとれる。よって, 中緯度においてはダクトの間隔は概ね 250km 程度と考えられるがその中にさらに細かなダクトが構成されている可能性がある。これらの解析結果は 1989 年オーストラリアのセドナで行った観測データ⁽⁷⁾とほぼ同一傾向となった。また, そのダクトの継続時間は観測時間の 22 時より 04 時までのほぼ 6 時間にもおよび, 低緯度の 2~3 倍の持続時間である⁽⁶⁾。

8. むすび

中緯度ホイ斯拉の伝搬特性を解明するためニュージーランドのオタゴで観測されたホイ斯拉を用いて, 電磁界解析法により到来方向 (方位角 θ , 入射角 i), 及び偏波パラメータ (u , v) を求めた。また, Tarcsai の開発したノーズ・イクステンション法を用い磁気圏内伝搬路を求めた。その結果, 電磁界解析法を用いホイ斯拉の地上磁気緯度から求めた L 値 (L_{DF}) とノーズ・イクステンション法によって磁気圏内伝搬路から求めた L 値 (L_n) には $L_{DF} = L_n - 0.41$ の関係式が得られた。また, この両 L 値の違いから, レイ・トレーシングにより中緯度におけるホイ斯拉ダクトは 3000km 程度の高さと途切れていることを明らかにした。そして, ダクトのエンハンスメントファクタは 5% 以内であることを示した。観測されたマルチパスホイ斯拉のダクト間隔は概ね 250km 程度で, かつまたダクトの径は 100~150km で, 低緯度の 2~3 倍である。これらの中緯度ホイ斯拉の継続時間はほぼ 6 時間にもおよび, 低緯度の 2~3 倍の持続時間である。

謝 辞

中緯度におけるホイ斯拉の観測は本学総合工学研究所の第 2 部門における研究テーマの一部として参加したものであり, 電気通信大学, ニュージーランドのオタゴ大学, オーストラリアのタスマニア大学との共同研究である。御助成頂いた関係各位に感謝する。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) Andrews M.K.: "On whistlers with very low dispersion", J. Atmos. Terr. Phys., 41, pp. 231-235 (1979).
- 3) 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).
- 4) Walker A. D. M.: "The theory of whistler propagation", Rev. Geophys. Space Phys., 14, pp. 629-637 (1976).
- 5) Ohta K., Hayakawa M. and Tanaka Y.: "Ducted propagation of daytime whistlers at low latitudes as deduced from ground-based direction finding", J. Geophys. Res., 89, A9, pp. 7557-7564 (1984).
- 6) Hayakawa M., Ohta K. and Tanaka Y.: "Further direction finding evidence on ducted propagation of low-latitude daytime whistlers", Res. Lett. Electr., 5, pp. 36-46 (1985).
- 7) Takahashi O., Ohta K. and Hayakawa M.: "On the structure of ducts for mid-latitude whistlers

- and their ionospheric transmission as deduced from the ground-based direction finding", PAGEOPH, 140, 3, pp. 519–535 (1993).
- 8) 太田健次: "ホイ斯拉到来方向の自動観測", 信学論 (B), J67–B, 8, pp. 869–876 (1984).
 - 9) 太田健次, 早川正士, 馬場清英, 江口博之: "低緯度ホイッスラーにおける到来方向の周波数依存性", Res. Lett. Atmos. Electr., 9, pp. 43–52 (1989).
 - 10) Tarcsai Gy.: "Routine whistler analysis by means of accurate curve fitting", J. Atmos. Terr. Phys., 37, pp. 1447–1457 (1975).
 - 11) 太田健次, 高橋 修, 江口博之, 早川正士: "ホイ斯拉解析を目的としたソナグラフ装置", 信学技報, EMCJ91–74, pp. 61–66 (1991).
 - 12) 永井 研, 太田健次, 早川正士, 島倉 信: "デジタルソナグラフによるホイ斯拉分散値の高精度測定", EMCJ92–70, pp. 19–24 (1992).
 - 13) 太田健次: "低緯度におけるホイ斯拉偏波特性の自動観測", 信学論 (B), J69–B, 9, pp. 967–975 (1986).
 - 14) Shimakura S., Okada T., Hayakawa M. and Tanaka Y.: "The relationship between the polarization of whistlers and their polarization", J. Geophys., 59, pp. 140–147 (1976).
 - 15) 高橋 修, 太田健次, 馬場清英, 江口博之, 早川正士: "高緯度におけるホイ斯拉ダクト下端の間隔と広がり", 信学技報, EMCJ91–75, pp. 67–74 (1991).
 - 16) Okada T., Iwai A. and Hayakawa M.: "A new whistler direction finder", J. Atmos. Terr. Phys., 43, pp. 679–691 (1981).
 - 17) Hayakawa M. and Ohta K.: "The propagation of low-latitude whistlers, A review", Planet. Space Sci., 40, 10, pp. 1339–1351 (1992).
 - 18) 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).
 - 19) 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).
 - 20) Tarcsai Gy, Strangeways H. J. and Rycroft M. J.: "Error sources and travel time residuals in plasmaspheric whistler interpretation", J. Atmos. Terr. Phys., 51, pp. 249–258 (1989).
 - 21) Bullough K. and Sagredo J. L.: "VLF goniometer observation at Halley Bay, Antarctica- I ", Planet. Space Sci., 21, pp. 899–912 (1973).
 - 22) Sazhin S. S., Hayakawa M. and Bullough K.: "Whistler diagnostics of magnetospheric parameters, A review", Ann. Geophys., 10, pp. 293–308 (1992).