

高緯度におけるホイ斯拉の電離層下降透過点

高橋 修*, 太田 健次**, 馬場 清英**, 江口 博之**, 早川 正士***

Ionospheric Exit Points of Whistlers at High Latitude

Osamu TAKAHASHI*, Kenji OTA**, Kiyohide BABA**, Hiroyuki EGUCHI**,
and Masashi HAYAKAWA***

(Received May 31, 1991)

The presence of field - aligned ducts of whistlers observed on the ground is of essential importance for not only middle latitude but also low latitude. However, the characteristics of those whistler ducts such as their expanse and interval of the distance are poorly understood. In order to study the ionospheric exit points of whistlers, multipath whistlers observed at Ceduna (geomagnetic latitude 41.9°) in Australia were analysed. A digital processing technique and a FFT method were used for direction finding by field analysis method.

The main results are as follows :

- (1) The radius of duct at 100km height, expanse of ionospheric exit points of whistlers observed at Ceduna, is about 100km.
- (2) The interval distance between exit points is about 500km.
- (3) The main lobe of incident angle larger than 40 degrees has not been observed.

1. まえがき

ホイ斯拉は雷放電によって発生した電磁波の一部が概ね地球の磁力線に沿って磁気圏プラズマ中を伝搬し、反対半球に到達する VLF 波帯の電磁波である。ホイ斯拉の伝搬群速度を V_g , 伝搬微小距離を ds とすれば, 全通路での遅延時間は(1)式で与えられる¹⁾。

$$t = \int_{\text{path}} (ds / V_g) = (1/2c) \int_{\text{path}} [f_p / (f_H)^{1/2}] ds = D f^{-1/2} \quad (1)$$

但し, f はホイ斯拉の周波数, c は光速, f_p はプラズマ周波数で, N を電子密度 (個/cm³) とすれば $f_p = 9N^{1/2}$ (kHz), f_H は電子ジャイロ周波数であり, 地磁気磁束密度を B (Gauss) とすれば $f_H = 2800B$ (kHz) の関係がある。また, D の値 (s^{1/2}) をホイ斯拉の分散値と言う。各緯度において得られた分散値より, 磁気圏プラズマ密度分布を知ることが可能である²⁾。

地上で観測されるホイ斯拉の磁気圏内伝搬は高緯度であれ低緯度であれ磁力線に沿った周囲電子密度より濃い(または薄い) 通路を伝搬するダクト伝搬であることは広く知られている^{3), 4), 5)}。近年, デジタル信号処理を用いたホイ斯拉の到来方向測定により, 超低緯度で観測され

*工学研究科電気工学専攻 (Department of Electronic Engineering)

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

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

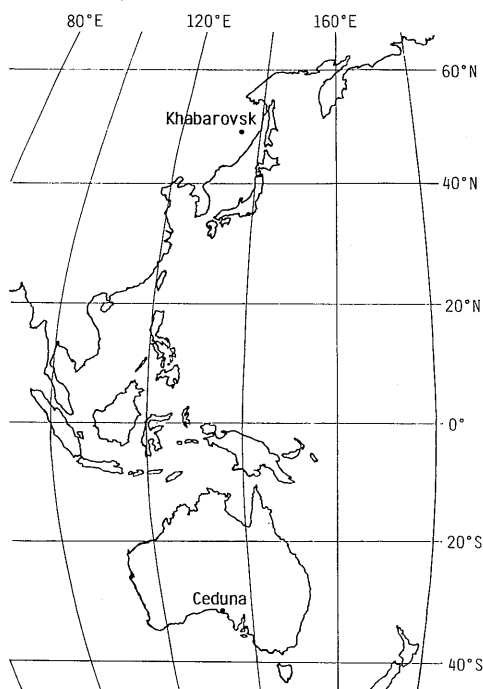
るホイスラもダクト伝搬であることが明らかになってきた^{6),7)}。また、長年に亘るホイスラのルーチン観測により、高緯度においてはホイスラダクトの生成が低緯度に比べて容易で、単一の雷放電によって発生した電磁波が隣接した複数のダクトを伝搬することにより発生するマルチパスホイスラ、及び同一ダクトを往復伝搬するエコートレーンホイスラが多く観測され、一方低緯度では活発な雷放電活動により発生した多数の電磁波が単一ダクトを伝搬することにより発生するマルチフラッシュホイスラが多く観測されることが示されている⁸⁾。かつ又、近年におけるホイスラの到来方位測定により高緯度においてはダクトの径が低緯度と比較し広いためディフューズホイスラが観測されるのに対し、低緯度ではダクトの径が狭いためピュアトーンホイスラが観測されていることも明らかになってきている⁹⁾。しかしながら、地磁気力線に沿ったダクトがどのような間隔で生成されているかについてはほとんど議論されていない。そこで、本論文においてはダクトの生成が比較的容易とされる高緯度において、電磁界解析法により求められたホイスラの到来方向（方位角，入射角）と偏波特性により、ダクトの広がりやダクトの間隔について議論する。

2. 電磁界解析法による到来方向測定

高緯度におけるホイスラの観測はオーストラリアのセドナ（Ceduna；地理座標 $32^{\circ}07'S$ ， $33^{\circ}42'E$ ，地磁気緯度 $41.9^{\circ}S$ ）において1989年8月9日より8月24日までの16日間，地方時（以下時間は全て地方時で示す，但し $LT = UT + 9.5$ ）22時00分より02時00分までの4時間における連続観測が行われた。このホイスラ観測は日本（代表者名古屋大学空電研究所助教授早川正士）－ソ連（代表IZMIRAN研究所O. A. Molchanov教授）の共同研究「VLF送信電波を用いた内部磁気圏波動・粒子相互作用の研究」として企画された共同観測によって行われたものである¹⁰⁾。

第1図はオーストラリア，セドナにおける観測地点とソ連，ハバロスク（Khabarovsk；地理座標 $48^{\circ}38'N$ ， $134^{\circ}51'E$ ，地磁気緯度 $38.5^{\circ}N$ ）の位置を示す。ハバロスクからVLF送信電波は 23.9 kHz ，出力 $500\text{ kW}/1000\text{ kW}$ で地磁気共役点近傍のセドナにおいてホイスラモード波の観測を行ったがその詳細については別に報告する予定であるので本論文においては割愛する。

ホイスラの到来方向と偏波パラメータはパーティカルアンテナに誘起する垂直電界一成分に対する地磁気子午面上の東西，南北に展張された直交ループアンテナに誘起する水平磁界二成分の振幅比と位相差により1観測地点でホイスラの電離層下降透過点を求める電磁界解析法が用いられている。本論文で用いる電磁界解析法では、



第1図 VLF送信局（Khabarovsk）と地磁気共役点近傍の観測地点（Ceduna）

電磁界三成分の同時観測が不可欠である¹¹⁾。直交ループアンテナ（ $S = 80\text{ m}^2$ ， $L_a = 265\mu\text{ H}$ ， $r_a = 1\Omega$ ）により水平磁界二成分と垂直アンテナ（ $h = 10\text{ m}$ ， $C_a = 120\text{ pF}$ ）により垂直電界一成分と広帯域（ $0 \sim 10\text{ kHz}$ ）に亘りデジタルレコーダに記録した。後に解析者によって再生された電磁界三成分の出力は $40\mu\text{ s}$ の変換速度で，16ビットのA/Dコンバータによってデジタル化され，1024のデータ長でのマイクロコンピュータによるFFT解析を行う。以上の操作により， 25 Hz の分解能で垂直電界一成分に対する水平磁界二成分の振幅比と位相差を求める¹¹⁾。

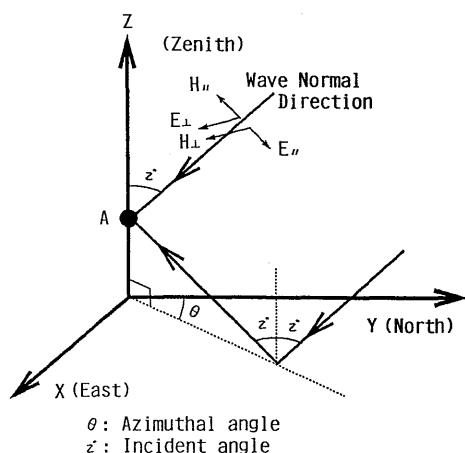
ここでは，電磁界解析法によるホイスラの到来方向と偏波パラメータの測定原理について簡単に述べよう¹²⁾。第2図に示すように観測地点へ入射する到来方向（方位角 θ 及び入射角 i ）は次式のように求められる。

$$\theta = \tan^{-1} (M_{Y-Z} \sin \phi_{Y-Z} / M_{X-Z} \sin \phi_{X-Z}) \quad (2)$$

$$i = \sin^{-1} \{ 1 / (M_{Y-Z} \cos \phi_{Y-Z} \cos \theta - M_{X-Z} \cos \phi_{X-Z} \sin \theta) \} \quad (3)$$

但し， M_{X-Z} ， M_{Y-Z} と ϕ_{X-Z} ， ϕ_{Y-Z} はそれぞれ垂直アンテナに誘起される垂直電界成分に対する東西，南北ループアンテナに誘起される水平磁界成分の振幅比と位相差である。

入射波は第2図のようにTM波成分（入射面に垂直な磁界成分を持つ）とTE波成分（入射面に垂直な電界成



第2図 ホイ斯拉到来方向測定座標系

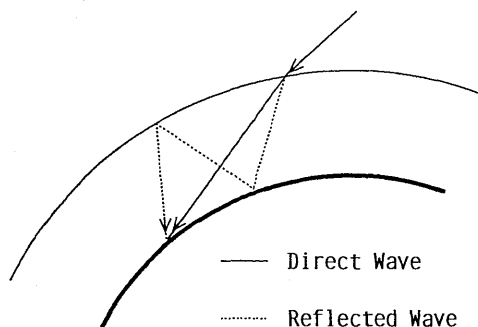
分)に分解でき、入射波の偏波は入射面内の磁界成分 H_y と入射面に垂直な磁界成分 H_z との比として次式のように定義する。

$$p = H_y / H_z = u - jv \quad (4)$$

すると、偏波パラメータ (u, v) は次式にて求められる。

$$\begin{aligned} u &= -(M_{X-Z} \cos \phi_{X-Z} \sin i + \sin \theta) / \cos i \cos \theta \\ v &= M_{X-Z} \sin \phi_{X-Z} \sin i / \cos i \cos \theta \end{aligned} \quad (5)$$

この電磁界解析法で求められるホイ斯拉の到来方向 (θ, i) はホイ斯拉の電離層下降透過点を示すものであるが、観測地点と電離層下降透過点が離れている遠距離伝搬の場合は電離層における多重反射の反射点をも同時に示すことになる。よって、(θ, i) で示される方向が電離層下降透過点であるかまたは電離層における反射点であるかは入射角度の分布、偏波パラメータ、直交ループアンテナに誘起する水平磁界二成分の位相差 (以下偏波角と記す) から推定される。



第3図 電離層・大地導波管伝搬の球面モデル

第3図に球面大地モデルにおけるホイ斯拉の電離層下降透過点と観測地点までの直接波と反射波の関係を示す。図より、ホイ斯拉の電離層下降透過点における射出角が十分広く、かつ又均一であれば観測地点で求められる入射角は直接波、及び1回反射、2回反射、3回反射等の多重反射波が求められる。よって、入射角より求められる各反射波による電離層での交差点がホイ斯拉の電離層下降透過点を示すこととなる。

3. 分散値と偏波角から求めた大地-電離層間多重反射による伝搬距離

ホイ斯拉の水平磁界二成分の偏波角からもホイ斯拉の伝搬特性を知ることができる¹³⁾。ホイ斯拉の電離層下降透過点において、ホイ斯拉の偏波特性は統計的に右旋性円偏波であり観測地点がこの電離層下降透過点より離れるにつれ右旋性楕円偏波から左旋性楕円偏波へと変動を繰り返して直線偏波に近づくこととされている¹⁴⁾。島倉は地磁気緯度が35°の母子里で観測された分散値の異なるホイ斯拉の偏波角を統計的に調べ、その解析結果よりホイ斯拉の分散値と偏波角に一定の相関があることを示した¹⁵⁾。その解析結果を観測地点のセドナに適応させると、地磁気緯度41.9°のセドナで観測されるハバロスク VLF 送信波の平均分散値 D が $59 \text{ s}^{1/2}$ 、その平均偏波角 δ が 90° であることより(6)式が得られる。

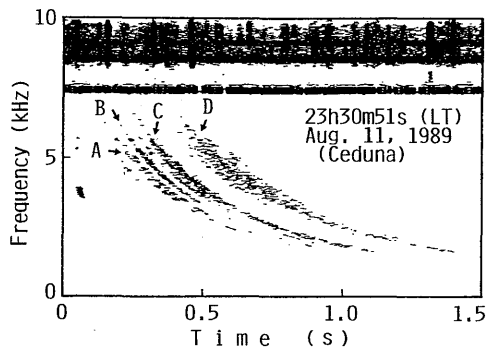
$$\delta = -3.34D + 287 \quad (6)$$

同様に伝搬距離 l (km) と偏波角の関係は(7)式となる。

$$l = 27(261 - \delta) - 4610 \quad (7)$$

4. 解析結果

第4図は8月11日23時30分51秒にセドナにおいて観測された代表的なホイ斯拉の周波数スペクトル (以下ソナグラフと記す) 例を示す。このソナグラフはFFTの解析結果をマイクロコンピュータのカラーモニタで ($f-t$) 表示させたものである¹⁶⁾。図において7.2 kHz以上の周波数はハバロスク VLF 送信波の23.9 kHzを9 kHzにビートダウンさせることにより発生したものである¹⁰⁾。図より明らかなように一群のホイ斯拉先行空電は単一であり、異なる伝搬路により発生したマルチパスホイ斯拉である。これらは異なる分散値を持つ多数のホイ斯拉によって構成されているが、比較的強度の強いホイ斯拉について矢印で示すように先頭よりA, B, C, Dの記号をつけるものとする。各分散値はAから順にそれぞれ $59 \text{ s}^{1/2}$, $62.5 \text{ s}^{1/2}$, $68 \text{ s}^{1/2}$, $79 \text{ s}^{1/2}$ である。



第4図 セドナで観測されたマルチパスホイスラ

電磁界解析法を用いて(2)~(5)式で求めた記号Aで示されるホイスラの到来方向(θ, i)と偏波パラメータ(u, v)をそれぞれ第5図, 第6図に示す。但し, 本論文で用いた解析データは全てホイスラの分散曲線に沿って7 kHzより1.5 kHzまで25 Hz間隔で時間をずらし1024のデータ長でFFT解析を行った結果をそのまま示すものであり, ホイスラの強度が雑音レベル(1 mV)以上と言う最低振幅制限以外の統計処理は全く加えていない。第5図において, (2)式で与えられる方位角は北方向に主体があるか概ね北方向の全角度から到来している。(3)式で与えられる入射角 i はほぼ天頂を指しており, $10\sim 35^\circ$ に分布し, 最大発生の入射角は $20\sim 25^\circ$ である。方位角が北方向のほぼ全角度より到来していることから推定すると, 電離層下降透過点に極めて近いダクトの径内に観測点が含まれるためと考えられる。この推定に基づく電離層下降透過点の広がり(電離層高度を100kmとすると半径約100kmとなる。このダクトの径は低緯度ホイスラの解析より得られる半径に比べ約2~3倍の広がりを持つ⁹⁾)。一方第6図において(5)式で与えられる偏波パラメータ(u, v)は u が0, v が-1にそれぞれの分布の中心があり右旋性円偏波に極めて近い状態で到来していることを示している。かつ又, 第7図に示す偏波角は 90° にその平均値があり, (7)式からも電離層下降透過点の直下に観測地点が存在することがここからも推定される。以上の点を考慮すると, 概ね観測地点セドナのほぼ真上より到来しているものと考えられる。

次に記号Bで示されるホイスラの到来方向と偏波パラメータをそれぞれ第8図, 第9図に示す。記号Bのホイスラは入射角が $15\sim 35^\circ$ に分布しており, そのピークは $15\sim 20^\circ$ である。方位のピークは 180° で, 全体として南側から到来していることは明らかである。また, 第8図で示される記号Bのホイスラの到来方位は記号Aのホイスラに比べはるかに方位角が南側に集中していることより記号Aのホイスラと比較してより遠方から到来していることを示している。 $15\sim 20^\circ$ の入射角が電離層下降透

過点からの直接波と仮定すると記号Aのホイスラのダクト径とほとんどが重なり第4図で示される分散値が $59\text{ s}^{1/2}$ と $62.5\text{ s}^{1/2}$ と言うように明かな違いがあることは理解できない。つまり, 分散値が $59\text{ s}^{1/2}$ と $62.5\text{ s}^{1/2}$ の伝搬路が互いに重なり部分を持つことはなく記号Aで求められたダクトの半径が約100kmとすれば少なくとも分散値が $62.5\text{ s}^{1/2}$ のホイスラダクトの中心は記号Aのホイスラダクトの中心から200km以上離れていなければならない。このことは第8図に示すホイスラの到来方位が第5図と比べ南側に集中していることから理解できる。入射角が $40\sim 45^\circ$ と $50\sim 55^\circ$ にサイドローブが現れている。セドナの観測地点から200km以上離れた地点に電離層下降透過点が存在するならば, $15\sim 20^\circ$ の多重反射によるメインローブより伝搬損失の少ない直接波が当然強く観測されるはずである。しかしながら, 第8図の入射角ではこのような強い直接波は全く観測されていない。この一見矛盾する解析結果は電離層下降透過点から自由空間への射出角が大地に対して垂直方向に極めて狭いことを暗示しているものと考えられる。このように射出角が垂直方向に極めて狭い場合は強い直接波がほとんど観測されず, 大地と電離層間を何回も多重反射した波のみが強く観測されるため電磁界解析法で電離層下降透過点を正確に求めることは極めて困難となる。この射出角が極めて狭い理由には電離層下降透過点が観測地点から高緯度側に存在することに原因があるかも知れない¹⁷⁾。

入射角を $10\sim 20^\circ$, $40\sim 45^\circ$, $50\sim 55^\circ$ の3群の入射波は第3図で示される多重反射波の合成によるものと考えられる。よって, これらの角度で伝搬する波の波源は電離層高度を100kmと仮定すると, 観測地点より411~415km, 581~684km, 814~880km, 904~970km, 1046~1246kmであり, 1279km以上は特定できない。第9図に示す偏波パラメータは第6図に比べ u がやや広く分布しているが $u=0, v=-1$ に中心があり, 記号Aのホイスラと同様に右旋性円偏波で到来している。かつ又, 第10図に示す偏波角は 75° にその中心が存在する。(7)式から推定される伝搬距離は概ね410kmであることより最も伝搬距離が短い411~415kmを選ぶ。よって, セドナの観測地点より方位角 180° で約400kmと推定される。

同様に, 記号Cで示されるホイスラの到来方向(θ, i)と偏波パラメータ(u, v)をそれぞれ第11図と第12図に示す。第11図より記号Cのホイスラは入射角 i が $15\sim 25^\circ$, $30\sim 35^\circ$ の二つに大きくピークが分かれている。また, $45\sim 55^\circ$, $60\sim 70^\circ$ にも分布が見られる。よって, 記号Bのホイスラの場合と同様に観測地点からの伝搬距離を求めると508~620km, 684~770kmであり, 834km以上は特定できない。第12図で示される偏波パラメータは記号Bのホイスラの偏波パラメータに比較し更に u, v に

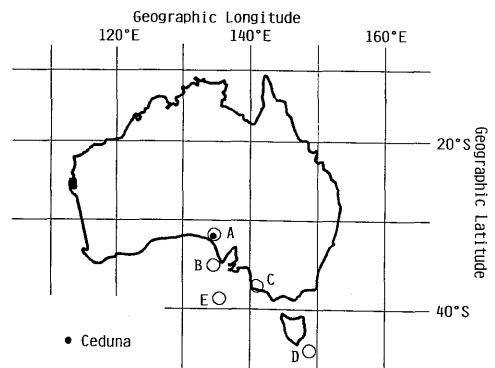
広がりが見られ、その中心地は $u=0$, $v=-1$ から離れ始め、右旋性の楕円偏波となっている。特に v はその最大値が -1 から 0 に近づく傾向がみられる。このことは記号 B のホイ斯拉よりも電離層下降透過点からの伝搬距離が長く直線偏波への傾向を示しつつある。かつ又、第 13 図で示される偏波角の中心は 55° であり、(7 式より) 950km となる。よって、方位角 130° で距離約 950km に電離層下降透過点が存在するものと推定される。

続いて、記号 D で示されるホイ斯拉の到来方向 (θ, i) を第 14 図に示す。入射角は $25 \sim 30^\circ$, $60 \sim 65^\circ$ にそれぞれのピークが存在する。 $25 \sim 30^\circ$ を中心とするメインローブは一群のホイ斯拉の中でも最も角度が狭い。一方、方位角は 130° に中心を持ち東南方向に広く分布している。このことは記号 D で示されるディフューズホイ斯拉の電離層下降透過点はセドナから見て垂直方向より水平方向に広がりを持っていることを意味している。つまり、ディフューズホイ斯拉における分散値の広がりは緯度方向のみならず経度方向にも広がっていることにより生ずるものと考えられる。この方位角は約 $100 \sim 220^\circ$ と各ホイ斯拉の中で最も広いことより電離層下降透過点の広がりが極めて大きいことが推定される。また、第 15 図に示す偏波パラメータ (u, v) も一群のホイ斯拉で最も幅広い広がりを見せている。これらの伝搬特性の広がりは第 4 図で示されるソナグラフからも明らかで、一群のホイ斯拉の中で最も幅広いディフューズホイ斯拉となっている。また、他の観測時間帯で解析されたディフューズホイ斯拉においても同様の伝搬特性の広がりが解析されていることにより、一般にディフューズホイ斯拉は伝搬ダクトの径が広く、このため少しづつ異なる伝搬特性を持つホイ斯拉が集まったものと考えられる¹⁸⁾。また、第 15 図において v が 0 から 1 にその分布の中心を持ち左旋性の楕円偏波であることが特徴的である。このような左旋性偏波のディフューズホイ斯拉は中緯度の母子里 (地磁気緯度 35°) で観測される分散値が $70\text{ s}^{1/2}$ のホイ斯拉と同一傾向を示している¹⁹⁾。このことは記号 A, B, C のホイ斯拉とは大幅に伝搬特性が異なっていることが推定される。この v は第 12 図で示される記号 C のホイ斯拉の値に比べ更に 0 に近づいておりより一層直線偏波への傾向を強めている。このことから記号 D のホイ斯拉は記号 C のホイ斯拉より更に遠方より到来していることが推定される。入射角は $25 \sim 30^\circ$, $60 \sim 65^\circ$ にそれぞれピークが存在する。観測地点からの伝搬距離は $1004 \sim 1021\text{km}$, $1167 \sim 1390\text{km}$, $1674 \sim 2316\text{km}$, ……の距離となる。また、第 16 図に示す偏波角は第 13 図で示される記号 C のホイ斯拉に比べ更に幅広く分布している。この傾向は第 15 図で示される偏波パラメータ (u, v) の場合と全く同様である。偏波角は $-90 \sim 0^\circ$ に広く分布しているがその中心値は

-30° である。このマイナスの角度は第 15 図に示される偏波パラメータより明らかのように左旋性偏波を示しており、(7 式に) 適応させるとその伝搬距離は概ね 1600km となる。このことより $1674 \sim 2316\text{km}$ の伝搬距離が妥当であると考えられる。よって、観測地点のセドナより方位角 130° で約 1600km 以上の遠方より到来しているものと考えられる。

5. 解析結果の考察

4 章で求めたホイ斯拉の電離層下降透過点は方位角において最大発生方位角をそのホイ斯拉の到来方位としてきた。しかし、低緯度と異なり高緯度に属す地磁気緯度 41.9° のセドナで観測されるホイ斯拉は Cousins の論文に指摘されているように複数の電離層下降透過点を持っている可能性もある²⁰⁾。つまり、緯度方向であれ経度方向であれ極僅か異なる伝搬路を同時に伝搬しているため異なる方位角を同時に示し、かつ又このために高緯度で観測されるホイ斯拉はディフューズタイプとなる。我々の解析した記号 A ~ D のホイ斯拉においてもこの傾向は見られる。例えば第 8 図における記号 B のホイ斯拉の方位角は 180° が最大発生方位角となっているが 145° を中心とした方位も示している。本論文で示したデータはホイ斯拉の強度が雑音レベル (1 mV) 以上と言う最低振幅制限以外の統計処理は全く加えていないため SN 比が良好でない周波数帯域では測定誤差が多く含まれる可能性も否定できない。しかしながら、第 8 図の方位角 145° や第 11 図で示される記号 C のホイ斯拉の方位角 170° は単なる測定誤差によるものとは考えられない。しかし、ここでは最大発生方位角で求められた電離層下降透過点を以て各ホイ斯拉のダクト位置とすることにする。



第 17 図 解析されたマルチホイ斯拉の電離層下降透過点

第 17 図に 4 章で得られた到来方向 (θ, i) より電離層高度を 100km と仮定したホイ斯拉の電離層下降透過点を地

図上に示す。記号 A で示されるホイスラダクトの広がり
は半径100km程度と推定されるので第17図では各ホイスラ
の電離層下降透過点を半径100kmの円で示す。記号 A で
示されるホイスラの電離層下降透過点は電磁界解析法に
よる到来方向, 偏波パラメータ, 偏波角とも観測地点近
傍を示しており, 電離層下降透過点がこの半径100km以内
からずれているものとは考えにくい。一方, 記号 B で示
されるホイスラは電磁界解析法により最大発生の方角角
が 180° は明かである。しかしながら, 電離層下降透過点
からの直接波を検出することはできなかったため, 伝搬
距離411~415km, 581~684km, 814~880km...の内, 偏波
角 75° を基準にした伝搬距離410kmより411~415kmを選
び方位角 180° 伝搬距離約400kmと推定した。581~680km
の可能性もないわけではないがセドナからの伝搬距離が
概ね630kmとなり, 偏波角 75° , 偏波パラメータの円偏波
からのずれ等から考えて到底630kmもの伝搬とは考えられ
ない⁷⁾。よって記号 B で示されるホイスラの電離層下降
透過点は図に示す半径100kmの円内に存在するものと考え
られる。また, 記号 C で示されるホイスラは記号 B のホ
イスラと比較し偏波角 55° であり偏波パラメータの円偏
波からのずれがさらに大きく記号 B のホイスラの伝搬距
離約400kmを大幅に越えることは明かである。電磁界解析
法で求められた入射角は比較的大きな $45\sim 55^\circ$ と $60\sim 70^\circ$
が求められているが, これら各 10° の角度が狭められな
いため834km以上は特定できなかった。このため, 偏波角
の 55° を基準にして950kmの伝搬距離を推定した。同一時
間帯に発生した他の分散値 $68\text{ s}^{1/2}$ のホイスラでは入射角
 $50\sim 55^\circ$ と $60\sim 65^\circ$ より伝搬距離580~612km, 833~969km,
1167~1246km...が求められており, かつ又1000kmを越
える伝搬では通常直線偏波となる傾向が強い²⁰⁾ため950kmの推
定は妥当と考えられる⁷⁾。

また, 第14図に示される記号 D のホイスラは最大発生
の到来方位角は 130° であるが観測地点の天頂方向から到
来する例外的な記号 A のホイスラを除いては最も幅広い
到来方位を示した。記号 D のホイスラ是一群のホイスラ
の中で最もディフューズしたホイスラであることは第4
図からも明かである。このため, SN 比が必ずしも良好
とは言えないが入射角のばらつきが極めて少ないことよ
り SN 比によるものとは考えられない。これはまさに,
ダクトの広がりを出すものと考えられる²⁰⁾。よって, 方
位角 130° , 伝搬距離約1600kmは記号 D のホイスラを生
成した複数のダクトの1つを指示しているに過ぎないと
考えられる。

この11日23時30分前後に観測された他のホイスラの電
離層下降透過点は到来方位 175° 伝搬距離950kmと推定さ
れる一点のみであり, これを第17図に記号 E で示す。残
りは全て同一下降透過点 A, B, C, D を示した。こ

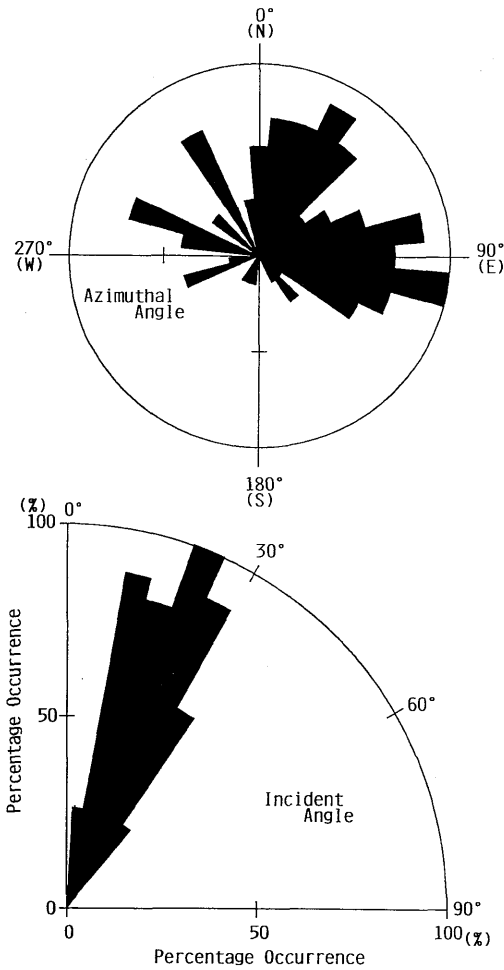
れらの電離層下降透過点は観測地点のセドナを中心にし
て概ね500km間隔で存在している。これらの解析結果より
高緯度におけるダクトは500km程度離れた距離間隔で生成
され, 電離層下降透過点の広がり概ね100kmと考えられ
る。しかし, 第4図で示されるように記号 A ~ D のホイ
スラの間には微弱ながら隣接して分散値の僅かに異なる
ホイスラも明らかに存在している。これは各々のホイス
ラのダクトの半径を100km程度としたが, この100kmの中
に更に細かなダクトが形成されている可能性も考えられ
る¹⁸⁾。これらダクトの微細構造を解明するデジタル信
号処理を用いた電磁界解析法によるホイスラの到来方向
測定技術が不可欠であり更に細かな解析を行う予定であ
る。

6. むすび

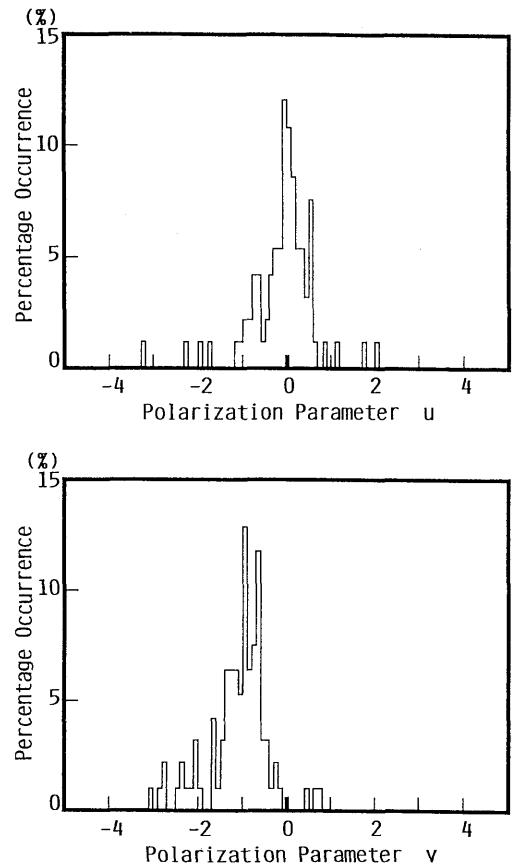
地磁気緯度 41.9° のオーストラリア, セドナにおいて,
観測されたマルチパスホイスラを用いて電磁界解析法に
より電離層下降透過点を求め, ダクト径とダクト間隔に
ついて検討した。その解析結果では, 高緯度におけるダ
クトの径は概ね100kmであり, 低緯度に比較し2~3倍程
度の広がりであり, かつ又多数のダクトが約500km間隔で
存在していることを明らかにした。また, この解析にお
いてダクト伝搬したホイスラの電離層下降透過点から自
由空間への射出角は比較的小さく, メインローブが 40° を
超えることは全く見られなかった。しかし, この射出角
の狭さは観測地点より高緯度に下降透過したホイスラを
解析したため生じた可能性もあるが, 超低緯度, 及び低
緯度における我々の解析において, ホイスラの電離層下
降透過点観測地点の近傍に常に存在することからも射
出角の狭いことは十分推定されていた。それ故, 電磁界
解析法で求められる到来方向が電離層下降透過点を示す
のか, またはただ単に電離層における多重反射地点を示
しているかを確かめる必要がある。このため電磁界解析
法で我々が従来より用いている偏波パラメータや偏波角
の有効性が明らかにされた。

7. 謝辞

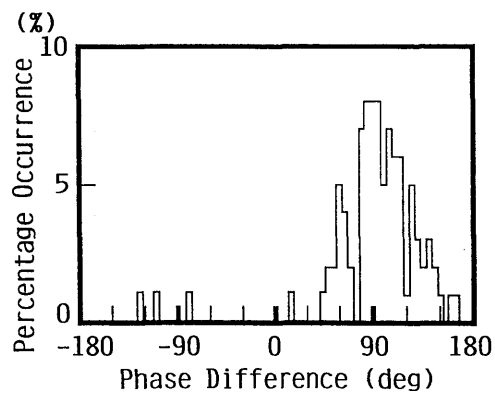
本研究は本学の特別研究費の御助成によるものであり
大学当局に感謝すると共に本観測の解析において, 有益
な討論を頂いた電子工学科三上 修教授, 千葉大学島倉
信助教授に深謝する。本解析に使用した装置は文部省私
立大学教育研究装置施設整備費(教-35)にて購入され
たものであり関係各位に感謝すると共に御尽力頂いた佐々
木一彦教授に深謝する。



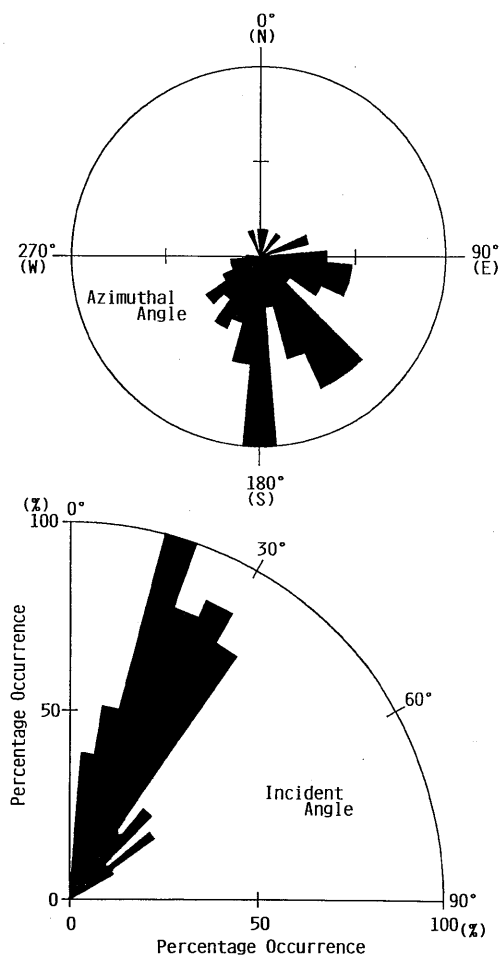
第5図 ホイスラ（記号A）の到来方位と入射角



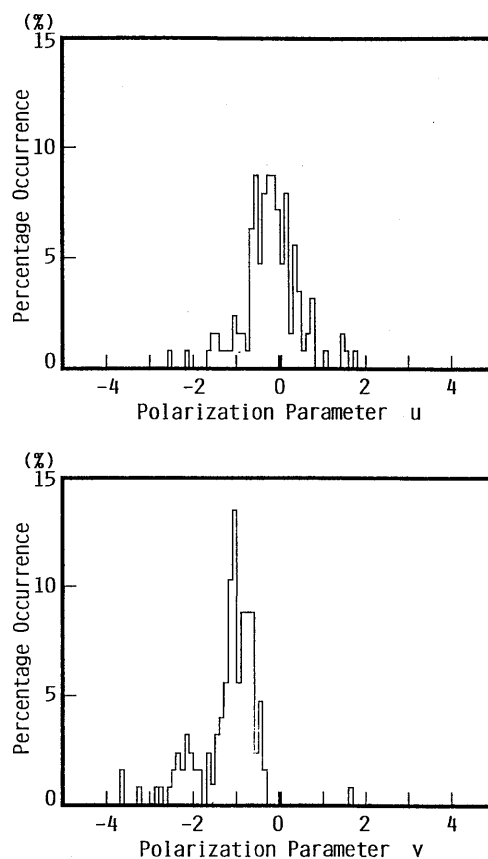
第6図 ホイスラ（記号A）の偏波パラメータ



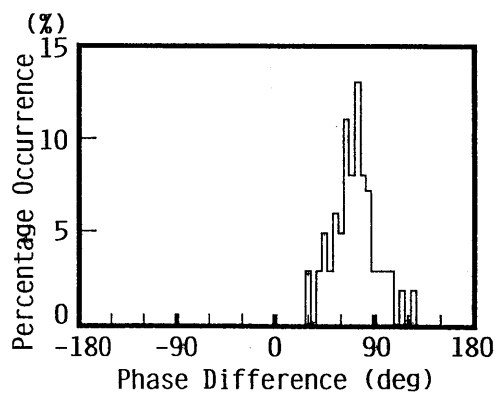
第7図 ホイスラ（記号A）の偏波角



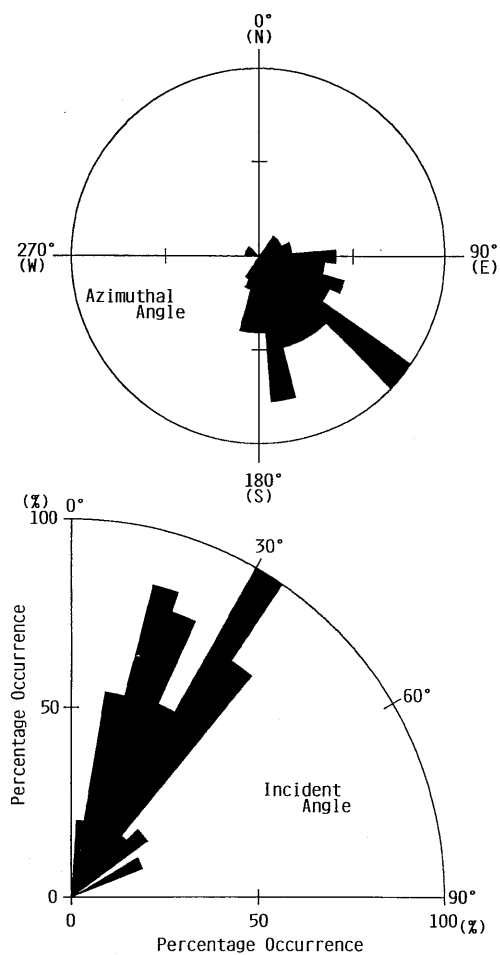
第8図 ホイスラ (記号 B) の到来方位と入射角



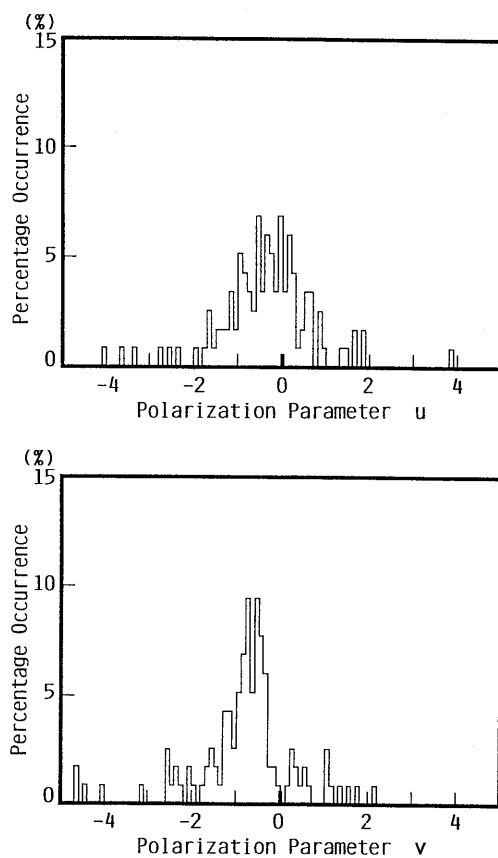
第9図 ホイスラ (記号 B) の偏波パラメータ



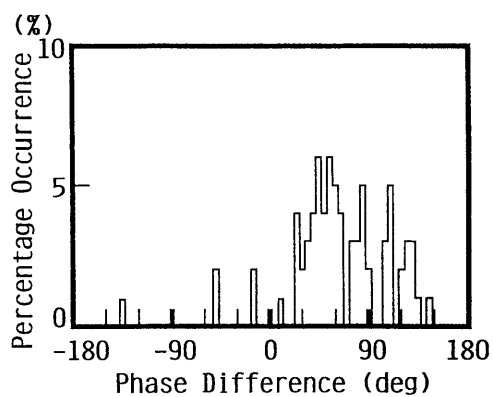
第10図 ホイスラ (記号 B) の偏波角



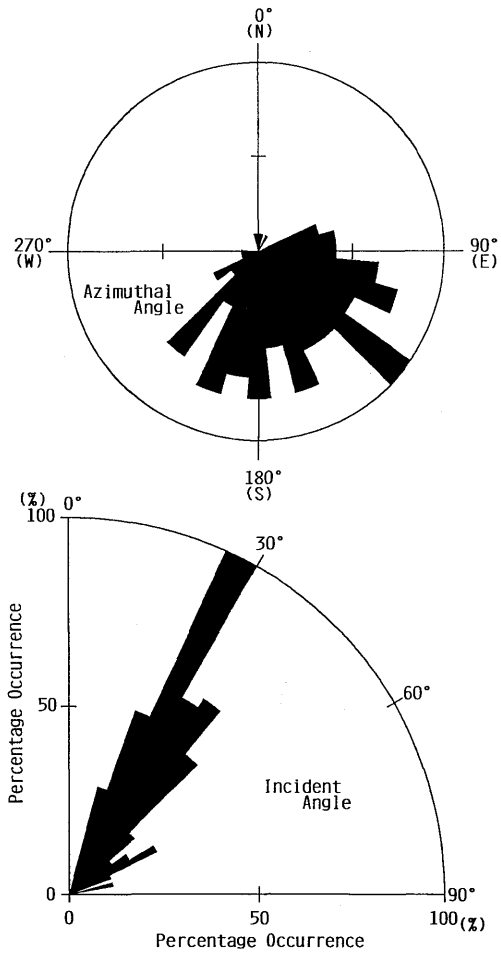
第11図 ホイスラ（記号C）の到来方位と入射角



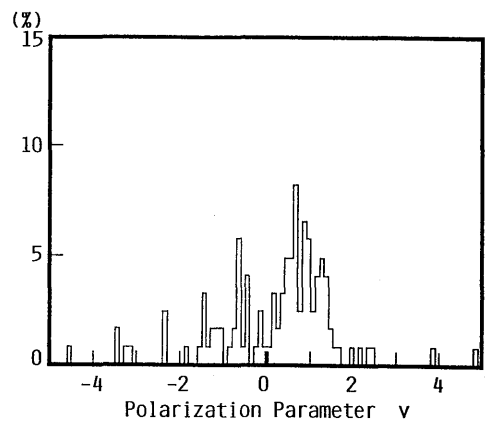
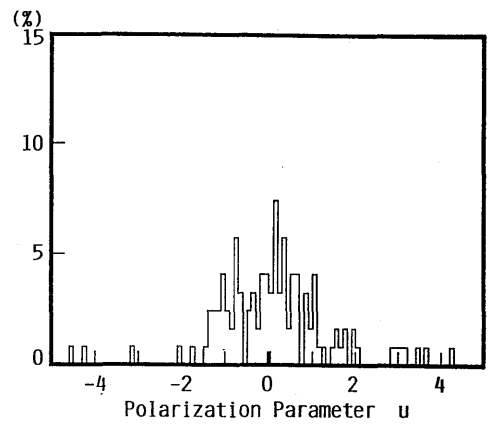
第12図 ホイスラ（記号C）の偏波パラメータ



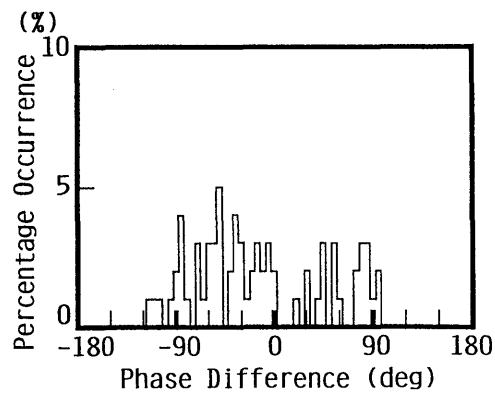
第13図 ホイスラ（記号C）の偏波角



第14図 ホイスラ (記号 D) の到来方位と入射角



第15図 ホイスラ (記号 D) の偏波パラメータ



第16図 ホイスラ (記号 D) の偏波角

参 考 文 献

- 1) L. R. O. Storey : "An investigation of whistling atmospherics", Phil. Trans. Roy. Soc. London, **A246**, pp. 113-141 (1953) .
- 2) R. A. Helliwell : "Whistlers and Related Ionospheric Phenomena" , pp. 180-201, Stanford Univ. Press, CA (1965) .
- 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. Sagredo : "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. 1685-1619 (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) 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ッスラの多点同時観測による到来方向測定", 信学論 (BII), **J73-BII**, 4, pp. 182-189 (1990) .
- 8) M. Hayakawa and Y. Tanaka : "On the propagation of low-latitude whistlers", Rev. Geophys. Space Phys., **16**, pp. 111-123 (1978) .
- 9) M. Hayakawa, K. Ohta and Y. Tanaka : "Further direction finding evidence of ducted propagation of low-latitude daytime whistlers", Res. Lett. Atmosph. Electr., **5**, pp. 35-46 (1985) .
- 10) 高橋 修, 太田健次, 馬場清英, 早川正士 : "共役点観測によるVLF送信局のホイッスラモード波測定", 信学技報, **EMCJ90-81**, pp. 73-80 (1990) .
- 11) 太田健次, 早川正士, 馬場清英, 江口博之 : "低緯度ホイッスラにおける到来方向の周波数依存性", Res. Lett. Atmos. Electr., **9**, pp. 43-52 (1989) .
- 12) 太田健次 : "ホイッスラ到来方向の自動観測装置", 信学論 (B), **J67-B**, 8, pp. 869-876 (1984) .
- 13) 太田健次, 江口博之 : "低緯度におけるホイッスラ偏波特性の自動観測", 信学論 (B), **J69-B**, 9, pp. 967-975 (1986) .
- 14) 長野 勇, 満保正喜 : "フルウェーブ解析法による各種VLF方向探知の誤差評価", 信学論 (B), **J72-B-II**, 2, pp. 72-80 (1989) .
- 15) 島倉 信 : "磁気圏ホイッスラ波の信号解析および電離層透過域推定に関する研究", 学位論文, 名古屋大学, pp. 61-64 (1987) .
- 16) 太田健次, 早川正士, 江口博之 : "低緯度ホイッスラのスペクトルにおけるパッチ状構造とその解釈", 信学論 (B), **J72-B-II**, 7, pp. 351-358 (1989) .
- 17) M. Hayakawa : "The enhancement factor of medium-latitude whistler ducts as deduced from the latitudinal characteristics of the Earth-Ionosphere waveguide propagation of whistlers after their ionospheric transmission", Res. Lett. Atmos. Electr., **10**, pp. 25-29 (1990) .
- 18) R. A. Helliwell : "Whistlers and Related Ionospheric Phenomena" , p. 129, Stanford Univ. Press, CA (1965) .
- 19) 岡田敏美, 山口敏明 : "母子里における左旋偏波ホイッスラの観測", 信学論 (B), **J68-B**, 11, pp. 1321-1322 (1989) .
- 20) M. D. Cousins : "Direction finding on whistlers and related VLF signals", Tech. Rept., **3432-2**, pp. 84-114, Radio. Lab., Stanford Univ. (1972) .