

高緯度におけるホイ斯拉ダクトの形態

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

The Structure of Whistler-Ducts at High Latitude

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

(Received May 30, 1992)

The ground-based direction finding carried out at Ceduna in Australia (geographic coordinates, $32^{\circ}07'S$, $133^{\circ}42'E$; geomagnetic latitude, 41.9° and $L=1.93$) during a period of 9 to 24 August in 1989 has yielded the structure for high-latitude whistlers and their ducts ionospheric transmission mechanism.

It is found that the high-latitude ducts tend to take place (or be formed) at same latitude on different longitudes, and such sheet-shaped duct includes several irregularities which act as field aligned ducts.

1. まえがき

ホイ斯拉の伝搬方法には、磁力線に沿って電子密度の濃い（又は薄い）部分を伝搬するダクト伝搬（磁力線沿い伝搬）と電子密度の異なる層をスネルの法則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伝搬の二通りがある。地上観測されるホイ斯拉の伝搬は、中緯度および高緯度ではダクト伝搬であると言うことはよく知られているが、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、地磁気緯度が $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ の超低緯度で観測されるホイ斯拉もダクト伝搬であることが明らかになってきた^{1), 2)}。

長年の観測により、このダクトを伝搬するマルチパスホイ斯拉、エコートレインホイ斯拉等さまざまな種類のホイ斯拉が観測されている。また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斯拉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斯拉が観測されることも明らかになってきている³⁾。これらホイ斯拉の伝搬ダクトは通常円筒型と考えられているが、ダクトの生成が比較的容易とされる高緯度における我々のホイ斯拉到来方向の測定から単純な円筒型のみでは説明がつかない種々の解析結果が得られた。そこで本論文では電磁界解析法により求められたホイ斯拉の到来方向（方位角、入射角）と偏波特性より、高緯度におけるホイ斯拉の電離層下降透過機構とダクトの形態について検討する。ただし本論文ではホイ斯拉の伝搬特性の違いから地磁気緯度 Λ を $\Lambda \leq 25^{\circ}$, $25^{\circ} < \Lambda < 35^{\circ}$, $\Lambda \geq 35^{\circ}$ の3つに分け、それぞれを低緯度、中緯度、高緯度と分類することにする。

2. 解析結果

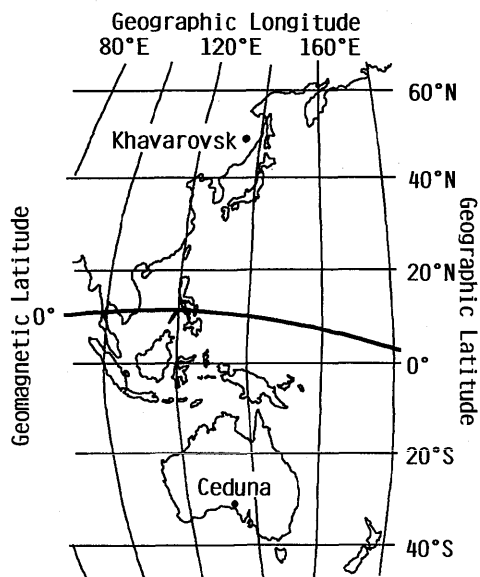
1) 高緯度ホイ斯拉のダクト構造

解析には第1図で示すオーストラリアのセドナ(Ceduna; 地理座標 $32^{\circ}07'S$, $133^{\circ}42'E$, 地磁気緯度 $41.9^{\circ}N$)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(以下時間はすべて地方時で表す、ただし $LT=UT$

*ソニー株式会社 (Sony Co.Ltd.)

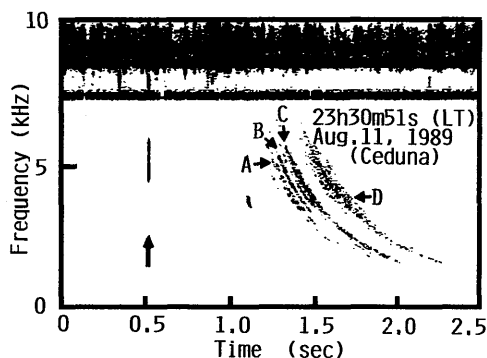
**電子工学科 (Department of Electronic Engineering)

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



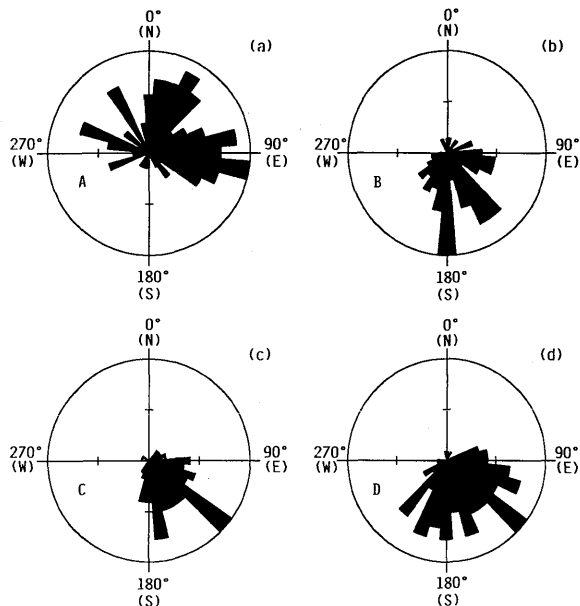
第1図 セドナの観測地点

+9.5) 22時00分より翌日の02時00分までの4時間におけるVLFホイスラモード波の連続観測中に同時観測された雷放電を源とするナチュラルホイスラを用いた。この観測は日本（代表者名古屋大学空電研究所早川正士助教授）—ソ連（代表者 IZMIPAN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」として企画されたものである⁴⁾。



第2図 マルチパスホイスラの周波数スペクトル

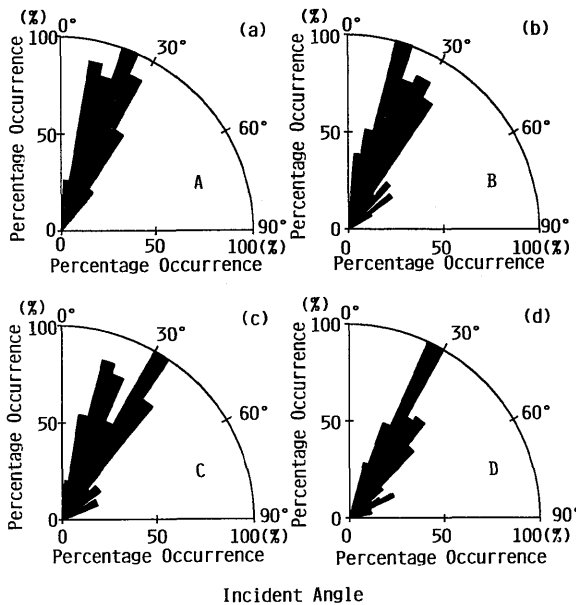
第2図に8月11日23時30分51秒にセドナにおいて観測された代表的なホイスラの周波数スペクトル（以下ソナグラフと記す）例を示す。このソナグラフはFFTの解析結果をマイクロコンピュータのカラーモニタで(f-t)表示させたものである⁵⁾。図において7.2kHz以上の周波数はハバロスクVLF送信波の23.9kHzを9kHzにビートダウンさせることにより発生したものである⁴⁾。



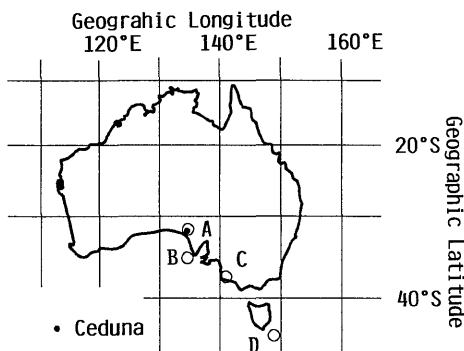
Azimuthal Angle

第3図 ホイスラA, B, C, Dの方位角

図より明らかなように一群のホイスラの先行空電（図において↑印で示す）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スラである。これら一群のホイスラの伝搬特性については文献⁶⁾で詳しく解析されているので参照されたい。これらのホイスラは異なる分散値を持つ多数のマルチパスホイスラによって構成されているが、比較的強度の強いホイスラについて矢印で示すように先頭よりA, B, C, Dの記号を付けるものとする⁶⁾。各分散値はAから順にそれぞれ $59s^{1/2}$, $62.5s^{1/2}$, $68s^{1/2}$, $79s^{1/2}$ である。各ホイスラの方角と入射角を第3図と第4図に示す。但し、本論文で用いた解析データはホイスラ信号をFFT解析し7kHzより1.5kHzまで25Hzの分解能で各周波数の成分を求め、電磁界解析法を用いて得られた到来方向（方位角、入射角）を集計したものである。また第4図に示す入射角は電離層における多重反射の反射点を示している可能性がある⁶⁾ので、更に偏波パラメータと偏波角を用いて実際の電離層下降透過点を推定した⁶⁾。第5図に解析された各ホイスラの電離層下降透過点を示す。但し、記号Aで示されるホイスラはセドナにおける観測地点のほぼ真上に電離層下降透過点が存在し、ホイスラダクトの電離層下端における広がり（電離層高度を100kmと仮定した場合半径100km程度と推定された⁶⁾）。よって、第5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。ここで求めたホイスラの電離層下降透過点は、方位角において最大発生方位角



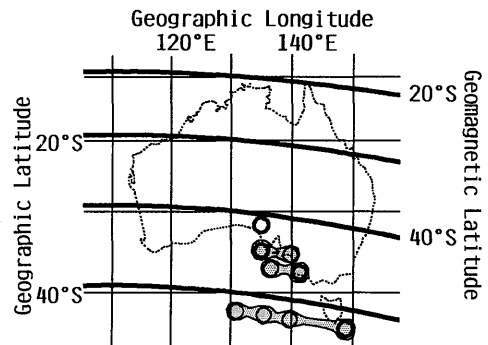
第4図 ホイストラA, B, C, Dの入射角



第5図 マルチパスホイストラの電離層下降透過点

をそのホイストラの到来方位とした。しかし、最大発生方位角以外にも最大と同程度の発生頻度を示す異なる方位角が複数存在する。例えば第3図(b)における記号Bのホイストラの方位角は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。本論文で示した到来方向の解析データはホイスト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3図(b)の方位角145°や第3図(c)で示される記号Cのホイストラの方位角170°はSN比に関係なく、またホイストラの周波数依存性でないことは確認されている。観測点のほぼ真上に下降透過したホイストラAはホイストラダクトが観測点を含むため全ての方位を示すと考えられるが、

観測点から離れた位置に下降透過したホイストラは特定の方向にピークを示すはずである。しかしながら、B, C, DのホイストラはSN比または解析周波数の影響ではなく、明らかに複数の到来方位を示す結果が得られた。この特性は、ここで示したA, B, C, Dのホイストラのみでなくセドナで観測されたほとんどのマルチパスホイストラが同様の傾向を示した。よって、同一ホイストラにおいて複数の電離層下降透過点が存在すると考えられる。高緯度ホイストラの各周波数において複数の到来方位が存在することはすでにCousinsの論文で示されている⁷⁾。しかし、その解釈については全く行われていない。そこで、我々は複数の方位角が存在するモデルについての考えを与える。即ち、ホイストラの分散値は同一であり到来するホイストラの方位角が複数存在することにより、ダクトが同一緯度で異なる経度方向に複数存在することになる。経度方向に広がったダクトが独立して存在するか、またはシート状につながりその中で特に高い電子密度の不均質が複数ありそれらが複数のダクトとして構成されている可能性もある。この解釈を第6図に示す。



第6図 シート状ダクトの概念図

このシート状に広がったダクトの可能性は我々の行った解析結果

- a) マルチパスホイストラである、
- b) 同一ホイストラでありながら複数の到来方位を持つ、
- c) 5分程度の極めて短時間に発生するホイストラであっても到来方位が明らかに異なる場合がある、
- d) 時としてマルチパスの1伝搬通路が存在しないホイストラも観測される、

からのみならず、Cousinsが行った高緯度の観測結果からも推定される。低緯度の本学超高層山岡観測所(岐阜県恵那郡、地磁気緯度25°N)³⁾、及び中国超低緯度のZhanjiang(地磁気緯度10°N)²⁾で観測されたホイストラの電離層下降透過点はいずれも円形の単1ダクトを示しているが、低緯度においてもシート状ダクトの可能性はHayakawa et al.の論文⁹⁾においてすでに示されている。

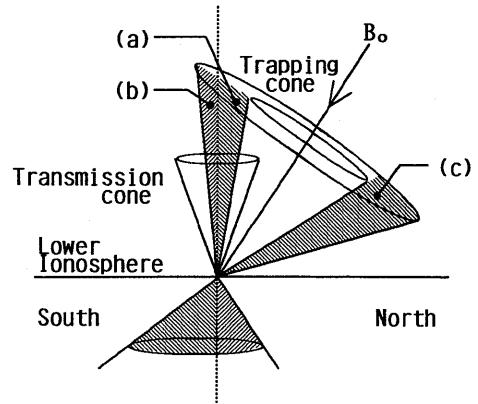
そして、伝搬L値が3.25~4の超高緯度においても Lester and Smith⁹⁾によって示されている。以上の点からセドナで観測されたホイスラのダクトは異なる経度方向に複数形成され、あたかもシート状に広がった1つのダクトと考えられる。そして、その中で各々の小さなダクトが形成され時間変化と共に生成と消滅を繰り返しているものと推定される。

2) ホイスラの電離層下降透過角度について

次に第4図に示すホイスラの入射角について考える。Helliwell¹⁰⁾によれば、ホイスラが電離層を下降透過する際にダクトに起因する捕捉円錐 (Trapping cone) と電離層下端での透過条件に起因する透過円錐 (Transmission cone) との重なり部分が重要な意味を持つ。この重なりが存在すればホイスラは地上へ下降透過でき、重なりを全角度から均一なエネルギー分布で透過するという Helliwell の Scattering assumption¹⁰⁾ が成立すれば観測点の遠方から到来するホイスラの入射角はかなり大きくなるはずである。しかしながら我々の解析したホイスラでは、観測点から950km離れた電離層下降透過点から到来するホイスラCや、1600km以上の遠方から到来するホイスラDの入射角は小さい。この小さな入射角は、ホイスラA, B, C, Dを含むセドナで観測された全てのホイスラ解析結果についても同様であり、メインローブが40°を超えることは全く見られなかった。このことは、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いことを示している。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¹⁰⁾を解析したために生じた可能性もある。しかし、超低緯度²⁾、及び低緯度³⁾における我々の解析では大きな入射角は全く観測されていない。これは同時に観測されるトウィークの1次モードにおける入射角が0°から90°まで広く分布¹¹⁾していることは対照的である。つまり、観測装置や解析手法の手違いではなく、ホイスラの入射角は Helliwell の Scattering assumption¹⁰⁾ が成立していないことを示している。

この射出角の狭さの原因についてダクト伝搬の捕捉円錐の関係から考察する。

雷放電の発生する反対半球の電離層上昇地点 (F₂層) では入射波の波面法線方向 (k ベクトル) は鉛直上方を向いている。しかし、その後磁気圏内においても Scattering assumption が成立すればホイスラ波の k ベクトルは捕捉円錐内に様に分布することになる。しかし、Iwai et al.¹²⁾の論文によると、この Scattering assumption はそれほど効いてはいない。したがって、電離層下降透過点では k ベクトルの向きは捕捉円錐のすぐ内側の部分に集中していると思われる。第7図に示す捕捉円錐と透過円錐に関係において(a)の部分にある k ベクトルは高緯度



第7図 電離層下降透過の射出角

側に伝搬するので我々の議論の対象にはならない。他方、(b)の部分は低緯度側に伝搬する k ベクトルでありセドナで観測されるホイスラB, C, Dに相当する。また、(c)の部分は全反射して電離層を透過できない。このモデルにおいて明かなように射出角は鉛直方向に極めて狭い角度に限定される。この内、垂直に近い角度で射出した波は長距離に伝搬する間に減衰し観測されなくなる。従って、どの緯度に下降透過したホイスラであってもほぼ同一の射出角を持つことになる。勿論、各緯度におけるホイスラの射出角は各種の条件で異なり、かつまた必ずしも図に示すような画一なる境界条件 (sharp boundary) とは限らないため微弱な直接波や低次の反射波も観測される可能性もあろう。また、ダクト下端より電離層下端までの伝搬において、伝搬 k ベクトルが鉛直方向に向く傾向はレイトレーシングによっても明らかにされており¹³⁾、この効果も考慮する必要がある。しかしながら入射角のメインローブが15°~40°に集中している事実は第7図の射出角で説明できるものと考えられる。

3. むすび

地磁気緯度41.9°のオーストラリアのセドナにおいて観測されたマルチパスホイスラを用い、電磁界解析法により電離層下降透過点を求めた。その解析結果から以下に示す高緯度ホイスラの伝搬機構が考えられる。

- 1) 高緯度では、同一ホイスラにおいて複数の電離層下降透過点が存在する。この結果を満たすモデルとして、ホイスラダクトがシート状につながりその中で特に高い電子密度の不均質がありそれらがダクトとして構成されていると考えるシート状ダクトを提案する。
- 2) 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透過円錐と捕捉円錐から求められる角度より狭い。

2) の結果は観測地点より高緯度で下降透過したホイ斯拉を解析したために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、ホイ斯拉の電離層下降透過点が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る。この電離層下降透過角度が予想より狭いのはダクト伝搬したホイ斯拉のベクトルの向きが主として捕捉円錐の最大角度に分布しているためと考えられる。

4. 謝 辞

本研究は本学における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有益な討論を頂いた本学電子工学科 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。

参 考 文 献

- 1) T.Ondoh, M.Kotani, T.Murakami, S.Watanabe and Y.Nakamura: "Propagation characteristics of low-latitude whistlers", J.Geophys.Res., **84**, pp.209 7-2104(1979).
- 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 (BII), **J73-BII**, 4, pp.182-189(1990).
- 3) 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).
- 4) 高橋 修, 太田健次, 馬場清英, 早川正士: "共役点観測によるVLF送信局のホイ斯拉モード波測定", 信学技報, **EMCJ90-81**, pp.73-80(1990)
- 5) 太田健次, 早川正士, 江口博之: "低緯度ホイ斯拉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).
- 6) 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の電離層下降透過点", 中部大学工学部紀要, **27**, pp.49-59(1991).
- 7) M.D.Cousins: "Direction finding on whistlers and related VLF signals", Tech.Rept., **3432-2**, pp.84-114, Radio.Lab., Stanford Univ.(1972).
- 8) M.Hayakawa, Y.Tanaka, T.Okada and A.Iwai: "Goniometric direction finding for low-latitude whistlers and their propagation mechanism", J.Geophys.Res., **86**, pp.6781-6793(1981).
- 9) M.Lester and A.J.Smith: "Whistler duct structure and formation", Planet Space Sci., **28**, pp.645-654(1980).
- 10) R.A.Helliwell: "Whistlers and Related Ionospheric Phenomena", p.57, Stanford Univ.Press, CA(1965).
- 11) 馬場清英, 太田健次, 友松 通, 早川正士: "トウィーク空電の波動特性の周波数依存性", 信学論 (BII), **J74-BII**, 11, pp.587-593(1991).
- 12) A.Iwai, T.Okada and M.Hayakawa: "Rocket measurement of wave normal direction of low latitude whistlers", J.Geophys. Res., **79**, pp.3873-3870(1974).
- 13) 中村義勝: "沖縄で観測された低緯度ホイ斯拉の到来方位特性", 信学論 (BII), **J75-BII**, 4, pp.229-238(1992).