

ホイ斯拉方向測定システム II

太田健次*, 江口博之*

The System of Direction Finding on Whistlers II

Kenji Ota* and Hiroyuki Eguchi*

(Received March 29, 1984)

A new method for direction finding on whistlers using an automatic detector of whistlers with the PLL, A/D converter and microcomputer has been developed. The propagation characteristics of whistlers at low latitudes is discussed, using the data from the automatic direction finding on whistlers at Yamaoka ($25^{\circ} 06'$ in geomagnetic latitude).

From the data, the following conclusions can be drawn:

- (1) One thundercloud continues to generate whistlers for a period of 1~2 hours.
- (2) The ionospheric exit points of whistlers are distributed slightly to the south of the station.
- (3) The field intensity of maximum occurrence probability of whistlers is in the range from 125 to 175 $\mu\text{V/m}$, about one half of that at middle latitudes and one tenth of that at high latitudes.
- (4) The ionospheric exit points of whistlers of different frequencies suggest ducted propagation; the diameter of the duct is less than the wave length of a whistler.

1. まえがき

ホイ斯拉は雷放電により放射された電磁波の一部がおおむね地球の磁力線に沿って磁気圏プラズマ中を伝搬し、対称半球へ到達する V L F 帯の電磁波である¹⁾。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。

$$t = \int_{\text{path}} \frac{ds}{V_g} = \frac{1}{2c} \int_{\text{path}} \frac{f_p}{\sqrt{f f_H}} ds = D f^{-\frac{1}{2}} \text{ (sec)} \quad (1)$$

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 / cm^3) とすれば f_p

$= 9 \sqrt{N} \text{ kHz}$, 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 $f_H = 2800 B$

kHz の関係があり、 D の値をホイ斯拉の分散値と言う。いろいろな緯度での多点観測により得られた分散値により、磁気圏プラズマ密度分布を知ることができ、磁気圏の構造やダイナミクスを調べることが可能である²⁾。また、地上で受信されるホイ斯拉は近年の研究により磁気圏内のダクトに捕捉されて伝搬しているものと考えられ³⁾、ホイ斯拉伝搬路の追跡はダクトの構造や、ダクトの発生及び消滅と言う極めて興味ある問題とも関係している⁴⁾。これらの問題解明には、ホイ斯拉伝搬路の位置決定が基本条件となっている。

ホイ斯拉到来方向の測定には大別して二つのものに分類できる。一つはゴニオメータによる多点観測であ

*電子工学科 (Department of Electronic Engineering)

る⁵⁾。しかし、ゴニオメータによる方向測定は入射波の仰角が低い垂直偏波の場合のみ有効であり、円偏波や楕円偏波の場合には偏波誤差が生ずる。したがってホイスラ検出数が最も多いと考えられる観測地点の近傍に電離層下降透過点が存在するホイスラに対して、方向測定誤差が最も大きくなる。他の一つの方法は水平磁界二成分と、垂直電界一成分の電磁界の振巾比と位相差の測定により到来方向を決定するものである⁶⁾。この方式は一点観測が可能であり、楕円偏波に対しても偏波誤差は生じない。どの観測方式においても、最大の問題点は観測地点に観測者が存在し、測定機器の操作、校正が必要なことである。また、たとえ連続観測を行ったとしても多量の磁気テープを再生し、聴覚モニタによりホイスラを見つけ出し、解析すると言う大変な手作業が必要である。我々は Phase Locked Loop (以下 PLL と記す) を用いたホイスラ自動検出器と A/D コンバータ、8 ビットマイクロコンピュータを組み合わせたホイスラ到来方向の自動観測装置を開発した⁷⁾。この装置を用い、超高層山岡観測所 (地磁気緯度 25°06') で行ったホイスラ到来方向の測定結果について報告する。

2. ホイスラ到来方向及び電界強度の決定

第 1 図に示す座標系において入射角 i (天頂方向より測る), 方位角 θ (北側より東側方向に測る) の方向よりホイスラが到来するものとする。但し, 入射面に対し直角な磁界成分を $H_{\perp}$ 電界成分を $E_{\perp}$ とする。地磁気座標系の東西, 南北に展張された直交ループアンテナとパーティカルアンテナに誘起するホイスラ信号波の電圧をそれぞれ V_x, V_y, V_z とする。 V_z に対する V_x, V_y の振巾比を M_{x-z}, M_{y-z} とし, 位相差をそれぞれ $\varphi_{x-z}, \varphi_{y-z}$ とすれば入射角 i と方位角 θ は (2), (3) 式で与えられる⁷⁾。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{M_{y-z} \sin \varphi_{y-z}}{M_{x-z} \sin \varphi_{x-z}}$$

$$i = \sin^{-1} \frac{1}{M_{y-z} \cos \varphi_{y-z} \cos \theta - M_{x-z} \cos \varphi_{x-z} \sin \theta}$$

但し, 大地は完全導体であり, 瞬時においてホイスラは単一周波数であると仮定する。また到来するホイスラは楕円偏波であり偏波パラメータを (u, v) とすれば⁸⁾, u, v は (4), (5) 式で与えられる。

$$u = -\frac{M_{x-z} \cos \varphi_{x-z} \sin i + \sin \theta}{\cos i \cos \theta} \quad (4)$$

$$v = \frac{M_{x-z} \sin \varphi_{x-z} \sin i}{\cos i \cos \theta} \quad (5)$$

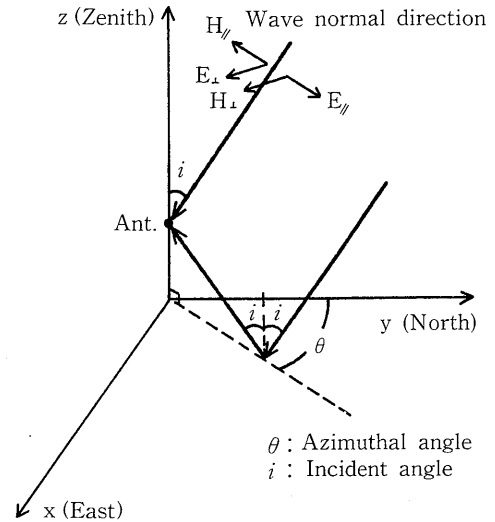


図 1 ホイスラ到来方向の座標系

到来波の最大電界強度 E_{max} は (6) 式で与えられる。

$$E_{max} = Z_0 H_{max} = Z_0 A_{\perp} \sqrt{\frac{1+u^2+v^2}{2} + \sqrt{\frac{(1+u^2-v^2)^2}{4} + u^2 v^2}} \quad (6)$$

但し, Z_0 は自由空間の特性インピーダンスであり, $A_{\perp}$ は V_x, V_y, V_z の最大振巾をそれぞれ $\tilde{v}_x, \tilde{v}_y, \tilde{v}_z$, パーティカルアンテナの実効高を l . アンテナ結合回路の伝達関数を $Y(\omega)$ とすれば⁶⁾, (7) 式で与えられる。

$$A_i = \left. \begin{aligned} & \frac{\tilde{v}_x}{2|Y(\omega)|lZ_0\sqrt{(\sin\theta + u\cos i\cos\theta)^2 + (v\cos i\cos\theta)^2}} \\ & \frac{\tilde{v}_y}{2|Y(\omega)|lZ_0\sqrt{(\cos\theta - u\cos i\sin\theta)^2 + (v\cos i\sin\theta)^2}} \\ & \frac{\tilde{v}_z}{2|Y(\omega)|lZ_0\sin i} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

よって入射角 i と方位角 θ を求めるには, 直交ループアンテナとパーティカルアンテナに誘起する出力電圧の振巾比と位相差が必要である。また到来波の電界強度を求めるには, いずれか一つのアンテナに誘起する出力電圧の最大振巾値も必要となる。ホイスラが到来し, 直交ループアンテナ及びパーティカルアンテナに誘起した信号波 V_x, V_y, V_z は A/D コンバータで 8 ビットにデジタル化され, PLL ホイスラ自動検出器より発生するトリガパルスによってマイクロコンピュータのメモリボードに読み込まれる⁷⁾。記憶された信号波を再現した一例を第 2 図に示す。但し, 製図の関係上プロット間隔は 2 倍にしてある。

メモリボードの最大記憶量に達したときか又は, 一定

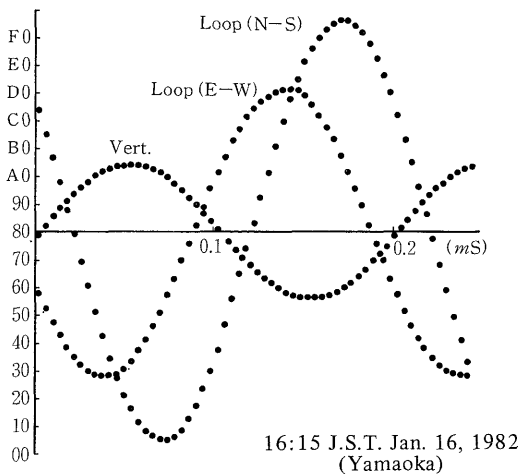


図2 各アンテナに誘起した信号波形の一例

時刻(毎日12:00)になったとき記憶されていたデータが印字される。しかしプリント出力時においては、デジタル化された全データをそのまま印字させる必要はない。ホイストラの到来方向及び電界強度を求めるに必要なデータはこれらの波形から80 Hを通過するクロスポイントの番地(位相を意味する)、振巾の最大値(MAX)及び最小値(MIN)を知るのみで良い。いずれかの信号波形が飽和している場合はFF H又は00 Hとなる1番地前のデータをMAX, MINとして採用し、それらの番地とクロスポイントの番地との差をステップ数とする。かつ他の信号波のMAX, MINもクロスポイントの番地にステップ数を加算した番地の内容に入れ換える。各アンテナに誘起した信号波形が二つ以上飽和した場合はステップ数の小さい信号波形を基準として同様の処理を行う。各波形のMAX, 及びMINの比により

M_{x-z}, M_{y-z} が求まり、各波形のクロスポイントの番地差より位相差 $\varphi_{x-z}, \varphi_{y-z}$ が求まる。また各信号波が飽和した場合のみクロスポイントの番地より周波数を求め、ステップ数及びその振巾値より最大振巾 $\tilde{v}_x, \tilde{v}_y, \tilde{v}_z$ を計算して求める。よってデータの印字データは各波形の一波長間隔で、クロスポイントの番地、ステップ数、MAX 値、MIN 値を表示すれば良い。但し、各波形において飽和がない場合のステップ数は00 Hとする。印字された各データを後日収集し、キー入力によりデータベース化し、入射角、方位角、電界強度を計算させる。

3. 観測結果

地上観測においてホイストラが検出されるためには

- 1) 対称半球での雷放電活動

- 2) 雷放電によって発生した VLF 帯電磁波の電離層上昇透過

- 3) 磁気圏プラズマ中の低減衰による伝搬

- 4) 観測地点側における電離層下降透過

が必要である。これらの条件が一つでも欠ければ地上でホイストラは観測されない。ホイストラ伝搬路の追跡を目的とした到来方向の測定には同一伝搬路を通り、同一地点で電離層を下降透過するホイストラ群を連続して観測する必要がある。ホイストラを自動検出するには到来波の受信強度が大きいほど容易であり、また到来方向測定には各アンテナに誘起した信号波の振巾を比較するため受信強度が大きいホイストラの到来が不可欠である。このような諸条件が揃う場合は低緯度では極めて少ない。ここでは1982年1月15日と1983年12月29日のホイストラ到来方向測定結果について記す。

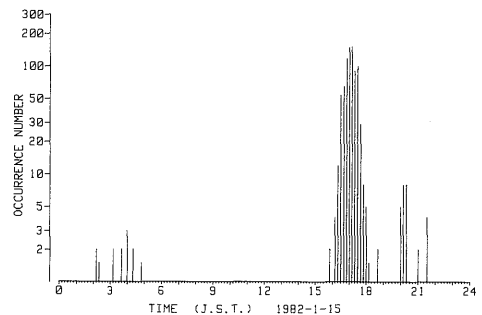


図3 自動観測によるホイストラの発生頻度

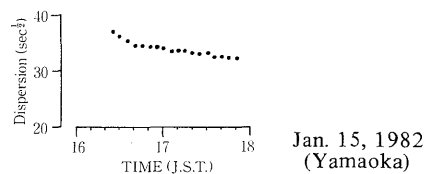


図4 自動観測によるホイストラの分散値

ホイストラのルーチン観測は山岡観測所より39 km離れた本学に常時無線伝送されている1~8 kHz帯の空電雑音を受信し、解析が行われている⁹⁾。我々はこの電波を傍受し、5チャンネルのPLLホイストラ検出器によりホイストラの発生数と分散値の自動観測を行っている⁴⁾。第3図のホイストラ発生頻度と第4図のホイストラ分散値のグラフはこの自動観測によって得たものである。総検出数835個/日の内16:10~18:10においては790個のホイストラが検出されている。この時間帯においてホイストラ検出数がガウス状分布をしており、また分散値はゆるやかな変動のみ示している。これらの点より単一ダクトによる伝搬であることが推定される⁴⁾。

一方、山岡観測所においてホイストラ到来方向測定の自

動観測器に検出されたホイスラの発生頻度を第5図に示す。

総検出数は68個/日である。5チャンネルPLLホイスラ検出器で10分単位時間当たり50個以上ホイスラが検出される程のホイスラ発生頻度であった場合、到来方向の自動観測システムが動作したことを示している。

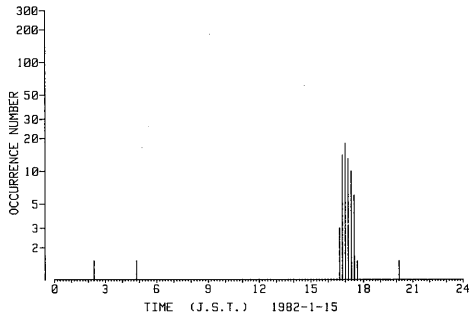


図5 到来方向測定器に検出されたホイスラ数

5チャンネルPLLホイスラ検出器の検出率は約25%であり、実際のホイスラ発生数は検出数の4倍以上と考えられる⁴⁾。これより10分単位時間当たり200個以上のホイスラ発生数によって本到来方向の自動観測が可能なことを示している。第6図は16時40分より17時50分までに観測された測定結果より方位角 θ と入射角 i を求め、ホイスラが電離層を下降透過した地点に投影した一例である。但し、中心点はアンテナ設置の上空であり、電離層の高さを80Kmとした。

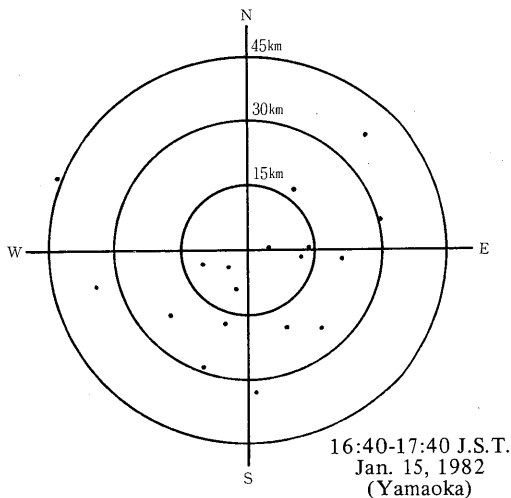


図6 電離層下降透過点 (1982-1-15)

一方(6)式によって求めた電界強度を強度別に発生率を示したものが第7図である。また1983年12月29日における電離層下降透過点の一例を第8図に、電界強度を第9図に示す。第6図と第8図に共通した傾向とし

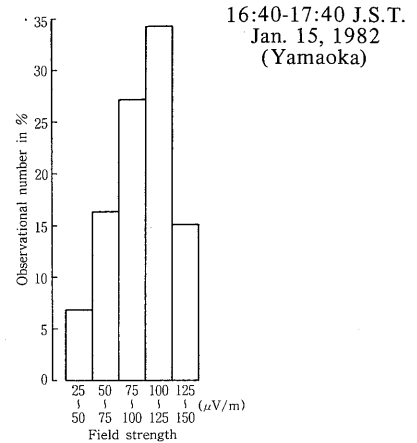


図7 電界強度分布 (1982-1-15)

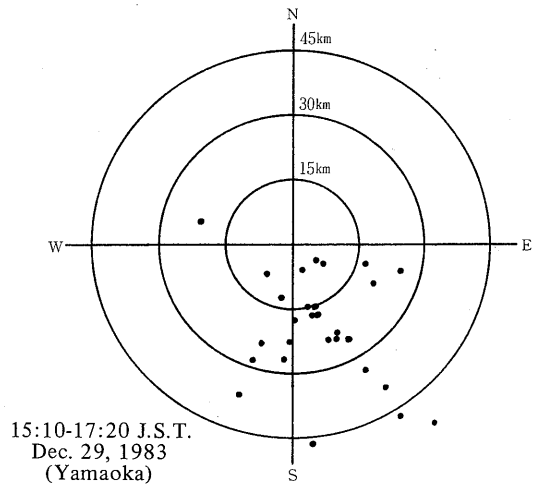


図8 電離層下降透過点 (1983-12-29)

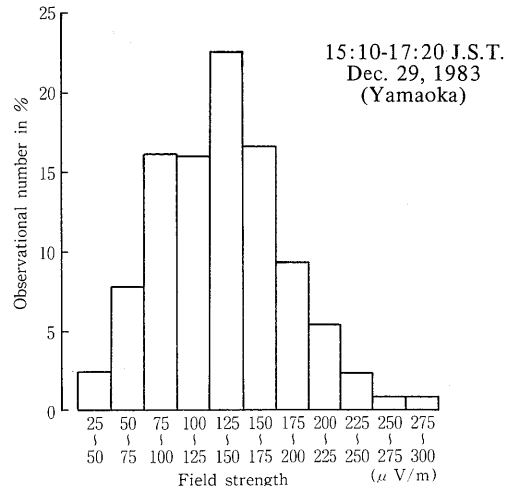


図9 電界強度分布 (1983-12-29)

て、ホイストラの電離層下降透過点は観測地点のほぼ上空にあり、やや南側に片寄っている。また透過点のバラツキはホイストラの波長 60 Km 以内である。これはホイストラが磁力線に沿ってダクト伝搬し、電離層を下降透過した後、高緯度方向へ強く伝搬すると言う従来からの研究を支持しているものと考えられる¹⁰⁾。また電界強度においては、第 7 図では 75~125 $\mu\text{V/m}$ に発生数のピークがあり、第 9 図においては 75~175 $\mu\text{V/m}$ にピークがある。これは本観測装置のホイストラ検出能力が 75 $\mu\text{V/m}$ 以下では急激に低下することを示している。125, 又は 175 $\mu\text{V/m}$ の数値はそれぞれの観測日における到来電界強度別発生分布のほぼ上限を示すものと考えられる。

同一ホイストラにおいて、異なる周波数における電離層下降透過点はホイストラの伝搬がダクト伝搬かノンダクト伝搬かの手掛りを示す重要なものである¹¹⁾。12 月 29 日の一例を第 10 図に示す。大文字は 5 kHz、小文字はそれに対応する 2.8 kHz の電離層下降透過点を示す。この観測結果においては 2.8 kHz も 5 kHz とほぼ同一点に下降透過点を持ち、第 8 図における下降透過点のバラツキの範囲内にあり、ノンダクト伝搬によるポーラクリップ現象は見られない。この結果からも地上で観測される低緯度のホイストラはダクト伝搬によるものと考えられる。

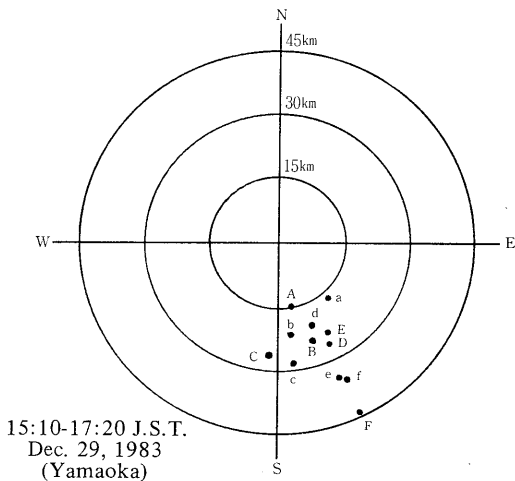


図10 電離層下降透過点の周波数依存性

4. むすび

PLL ホイストラ検出器, A/D コンバータ, 8 ビットマイクロコンピュータを用いたホイストラ到来方向の自動観測システムを開発し、超高層山岡観測所において連続観測を行った。その観測結果より、以下の結論を得た。

1) 低緯度におけるホイストラの発生から消滅に至る継

続時間は約 1 ~ 2 時間である。

- 2) ホイストラの到来方向は観測地点のほぼ上空にあり、やや南側に片寄る傾向にある。
- 3) ホイストラの到来電界強度は約 125~175 $\mu\text{V/m}$ に発生分布の上限がある。これは中緯度の 1/2 程度、高緯度の 1/10 程度である^{8), 1)}。
- 4) 電離層下降透過点の周波数依存性は見られない。
- 5) 2), 4) より低緯度において地上で観測されるホイストラはダクト伝搬であり、ダクトの広がりにはホイストラの一波長以内で、かつまた、電離層を透過後は高緯度方向に強く伝搬する傾向にある。

また使用した A/D コンバータは 8 ビットであり、変換速度は 2 μs のため、振巾において (使用フルスケール入力電圧レンジ) / 127 V の振巾誤差があり、位相においては 2 $\mu\text{s} \times (\text{検出周波数}) \times 360^\circ$ の位相誤差が含まれる。これらの誤差は従来の方式に比べ無視できる程度であり^{6), 8)}、出力がデジタル量で得られるため多量のデータが処理できる。観測結果より本装置ではホイストラの到来電界強度が 75 $\mu\text{V/m}$ 以下において検出率が低下することが判明した。今後、観測結果の誤差論について、またより高性能はホイストラ到来方向測定器の開発について研究を進めたいと考えている。

5. 謝辞

本研究は本学の特別研究費の御援助によるものであり、大学当局と三上 修主任教授の御尽力に厚く感謝する。観測は超高層山岡観測所で行ったものであり、米沢利之教授と栗本計助教授に感謝する。またホイストラ伝搬理論及び到来方向の測定データに関し、有意義な御検討を頂いた名古屋大学空電研究所、早川正士助教授に深謝する。

なお観測機器の製作とデータ整理には 57 年度卒研究生青山直樹君、今田 元君、梅田 通君、58 年度卒研究生市川勝也君らの協力を得たことに謝意を表す。

文 献

- 1) Helliwell, R. A.: "Whistlers and Related Ionospheric Phenomena", p. 1-10, 1966. Stanford Press
- 2) Park, C.G.: "Whistlers". Handbook of Atmospherics, vol. II, 21, 1982
- 3) A.D.M. Walker: "The theory of whistler propagation", Rev. Geophys. Space Phys., 34, 629, 1978
- 4) 太田, 江口: "地磁気擾乱時におけるホイストラダクトの生成と消滅", 信学技報, A-P 78-106
- 5) Watts, J.M.: "Direction finding on whistlers", J. Geophys. Res., 64, 2029, 1959
- 6) Turuda, K. and K. Hayashi: "Direction finding technique for

- elliptically polarized VLF.", J. Atmosph. Terr. Phys., 37, 1193, 1973
- 7) 太田, 江口: "ホイッスラ方向測定システム", 中部工業大学紀要, **18-A**, 1982
- 8) 岡田, 岩井: "低緯度ホイッスラの偏波並びに電磁界強度の測定装置", 電気学会論文誌, 15, 55-A10, 昭 55-2
- 9) 栗本, 渡辺, 武知: "Whistler 観測システムと最近の Whistler 諸特性", 中部工業大学紀要, **13-A**, 1977
- 10) Hayakawa, M. and Y. Tanaka: "On the propagation of low-latitude whistlers", Rev. Geophys. Space Phys., 16, 111, 1978
- 11) 木村, 松尾: "POGO 衛星で観測された VLF 諸現象", IASY シンポジウム, 東大宇宙研, 1969