低緯度ホイッスラーにおける到来方向の周波数依存性 *

太田 健次 ** 早川 正士 ***

馬場 清英 ** 江口 博之 **

** 中部大学工学部

*** 名古屋大学空電研究所

Abstract. In order to study the propagation mechanism of whistler and also to deduce the magnetospheric density from the dispersion value of whistlers, it is of great importance to determine experimentally the region where whistlers emerge from the ionosphere. We have developed a wide-band field-analysis direction finding system based on the simultaneous measurements of two horizontal magnetic field components and one vertical electric field component.

It is found that there is no frequency dependence on the arrival direction and the polarization of whistler, which will provide further information to our previous findings at a particular frequency.

1. はじめに

ホイッスラーは雷放電により放射され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、反対半球へ到達するVLF (Very Low Frequency) 帯の電磁波である(Storey, 1953)。ホイッスラーの伝搬群速度を v_g 、伝搬微小距離を ds とすれば全伝搬路での遅延時間は

$$t = \int_{\text{Path}} ds / v_g = (1/2c) \int_{\text{Path}} [f_p / (ff_H)^{1/2}] ds = D f^{-1/2} \text{ (sec)} \quad (1)$$

となる。但し、 D の値をホイッスラーの分散値 ($\text{sec}^{1/2}$) と言い、 f はホイッスラーの周波数 (Hz)、 c は光速 (m/sec)、 f_p はプラズマ周波数 (Hz)、 f_H は電子

* THE FREQUENCY DEPENDENCE OF IONOSPHERIC EXIT POINTS OF LOW-LATITUDE WHISTLERS

** K. Ohta, K. Baba, and H. Eguchi

College of Engineering, Chubu University, Kasugai, 487

*** M. Hayakawa

Research Institute of Atmospherics, Nagoya University, Toyokawa, 442

ジャイロ周波数 (Hz) である。N を電子密度 (個/cm³) とし、磁気赤道上の地磁気磁束密度を B (Gauss) とすれば、

$$f_p = 9N^{1/2} \text{ (kHz)} \quad (2)$$

$$f_H = 2.8B \text{ (MHz)} \quad (3)$$

の関係がある。

よって、ホイッスラーの分散値を求めることにより伝搬路における電子密度の積分値が分かる (Helliwell, 1965)。しかしながら、高緯度で観測されるノーズホイッスラーを除いては電子密度の推定にはホイッスラー伝搬路の位置決定が基本条件となっている。ホイッスラーの磁気圏内伝搬モードはダクト伝搬とノンダクト伝搬との二種類に分類される (Park, 1982)。主として地上で観測されるホイッスラーは高緯度のみならず低緯度であってもダクト伝搬であることが理論的にも、実験的にも認められるようになってきた (Walker, 1976; Hayakawa, 1978)。ダクト伝搬の実験的証明にはホイッスラー到来方向の周波数依存性を測定する必要がある (Hayakawa, 1974)。通常、ホイッスラー到来方向の測定にはゴニオメータを用いた多点同時観測法と、一観測点において直交ループアンテナと垂直アンテナに誘起する水平磁界二成分と垂直電界一成分の電磁界よりホイッスラーの到来方向

(方位角 θ 、入射角 i) を求める電磁界解析法が一般に用いられている (Tsuruda et al., 1975; Okada et al., 1981; 太田, 1984)。異なる二周波数でのホイッスラー到来方向の測定は、到来したホイッスラーがダクト伝搬かノンダクト伝搬かを決定づけるものであり、かつ又、電離層と大地間の伝搬過程を示す手がかりを得るために極めて重要である。そこで、岡田らによって、異なる二周波数でのホイッスラーの到来方向と偏波特性が測定され、それらがホイッスラーの周波数に依存しないことを示した (岡田 他, 1978; 太田 他, 1984)。かつ又、直交ループアンテナに誘起する到来ホイッスラー波の水平磁界二成分よりホイッスラーの偏波特性が広い周波数範囲に亙り一定であることを見いだした (太田 他, 1986)。しかし、これらの測定はいずれも自動観測方式を用いたため到来方向と偏波特性の細かな周波数依存性を同時には求めることができなかった。よって、ホイッスラーの到来方向と偏波特性を広周波数帯域に亙り同時に測定することが必要となった。

今回、PCM (Pulse Code Modulation) レコーダとFFT (Fast Fourier Transform) 解析による広周波数帯域における低緯度ホイッスラーの到来方向と偏波特性の周波数依存性を求めたのでここにその解析結果を報告する。

2. 電磁界解析法によるホイッスラー到来方向測定原理

Fig. 1 に示す観測座標系においてホイッスラーが入射角 i (天頂方向より測る)、

方位角 θ (北側より東側方向に測る) の方向より単一平面波で到来するものとする。入射面に直交する磁界成分を $H_{\perp}$ 、入射面に平行な磁界成分を $H_{\parallel}$ 、偏波パラメータ P を (u, v) とすれば式 (4) が定義できる (Okada et al., 1977)。

$$\begin{aligned} H_{\perp} &= A_{\perp} \exp(j\omega t) \\ H_{\parallel} &= A_{\parallel} \exp(j(\omega t - \alpha)) \\ P &= H_{\parallel} / H_{\perp} = u - jv \end{aligned} \quad (4)$$

但し、 $A_{\perp}$ 、 $A_{\parallel}$ はそれぞれの成分波の振幅、 ω は角周波数、 α は両成分間の位相差であり、アンテナには下降ホイッスラーの直接波と完全導体である大地で一回反射した反射波が到来するものと仮定する。

東西、及び南北に展張したループアンテナと垂直アンテナに誘起する電圧をそれぞれ V_x 、 V_y 、 V_z とすれば式 (5) が得られる。

$$\begin{aligned} V_x &= Y_x(\omega) \{ -(\sin \theta + u \cos i \cos \theta) \cos \omega t - v \cos i \cos \theta \sin \omega t \} \\ V_y &= Y_y(\omega) \{ (\cos \theta - u \cos i \sin \theta) \cos \omega t - v \cos i \sin \theta \sin \omega t \} \\ V_z &= Y_z(\omega) \{ \sin i \cos \omega t \} \end{aligned} \quad (5)$$

但し、 $Y_x(\omega)$ 、 $Y_y(\omega)$ 、 $Y_z(\omega)$ は東西、南北ループ、及び垂直アンテナ回路におけるアンテナ系を含めた伝達関数の周波数特性を示す (太田 他, 1986)。

各アンテナ回路における周波数特性を同一化した後、 V_z に対する V_x 、 V_y の振幅比、及び位相差を各々 M_{x-z} 、 M_{y-z} と ϕ_{x-z} 、 ϕ_{y-z} とすればホイッスラー到来の方位角 θ 、入射角 i 、及び u 、 v は式 (6) で求められる (Okada et al. 1977; 太田 他, 1986)。

$$\begin{aligned} \theta &= \tan^{-1} (M_{y-z} \sin \phi_{y-z} / M_{x-z} \sin \phi_{x-z}) \\ i &= \sin^{-1} \{ 1 / (M_{y-z} \cos \phi_{y-z} \cos \theta - M_{x-z} \cos \phi_{x-z} \sin \theta) \} \\ u &= -(M_{x-z} \cos \phi_{x-z} \sin i + \sin \theta) / \cos i \cos \theta \\ v &= M_{x-z} \sin \phi_{x-z} \sin i / \cos i \cos \theta \end{aligned} \quad (6)$$

Fig.1. The configuration of the problem.

なお、式(4)、(5)、(6)の導入については Okada et al. (1977)、太田 (1984)、及び太田 他 (1986) の参考文献を引用した。

また、方位角 θ と入射角 i の測定誤差は式(6)より、それぞれ式(7)の $\Delta\theta$ と Δi で示される。

$$\begin{aligned}\Delta\theta = & (|\sin 2\theta|/2)[(\Delta V_x/V_x) + (\Delta V_y/V_y) \\ & + (\cos\phi_{x-z}/\sin\phi_{x-z})\Delta\phi_x + (\cos\phi_{y-z}/\sin\phi_{y-z})\Delta\phi_y \\ & + \{(\cos\phi_{x-z}/\sin\phi_{x-z}) - (\cos\phi_{y-z}/\sin\phi_{y-z})\}\Delta\phi_z] \\ & (7) \\ \Delta i = & (\sin^2 i / \cos i) \{x(\Delta V_x/V_x) + y(\Delta V_y/V_y) \\ & + (\Delta V_z/V_z)(x-y) + \Delta\theta(y\tan\theta + x\cot\theta) \\ & + x\Delta\phi_x \tan\phi_{x-z} + y\Delta\phi_y \tan\phi_{y-z} + \Delta\phi_z(y\tan\phi_{y-z} - x\tan\phi_{x-z})\}\end{aligned}$$

但し、 x 、 y は

$$x = (V_x/V_z)\cos\phi_{x-z}\sin\theta, \quad y = (V_y/V_z)\cos\phi_{y-z}\cos\theta \quad (8)$$

であり、 V_x 、 V_y 、 V_z の振幅測定誤差をそれぞれ ΔV_x 、 ΔV_y 、 ΔV_z 、位相測定誤差をそれぞれ $\Delta\phi_x$ 、 $\Delta\phi_y$ 、 $\Delta\phi_z$ とする。

これらの誤差はPCMレコーダとFFTに付属するA/D (Analog to Digital) コンバータの特性、及び θ と i の各数値により異なる。

3. ホイッスラー到来方向測定システム

Fig. 2 にPCMレコーダによるホイッスラー到来方向の観測システムを示す。Fig. 2 において、各アンテナに誘起するホイッスラー信号波は最大利得80dBの前置増幅器に導かれる。この増幅器には2~6kHzのBPF (Band Pass Filter) が挿入されVLF局や商用電源の雑音を除去している。その後、100mのケーブルで観測室内に導かれる。観測室内に設置されている主増幅器は最大利得40dBである。主増幅器にはPCMレコーダの補正に用いる較正用信号が印加される。PCMレコーダは2台で構成されており、1台には東西、南北ループアンテナの出力が記録される。他の1台には南北ループアンテナの出力と垂直アンテナの出力が記録される。PCMの標準化周波数は44.1kHzであり、量子化ビット数は14ビットである。PCMレコーダより再生されたホイッスラーの各信号波は、12ビットのA/Dコンバータでデジタル量に変換される。サンプリングタイムは40 μ sであり、1024個のデータをFFT解析することにより、周波数分解能は25Hzで0~10kHzまでの振幅比と位相差が解析される。FFT解析器に付属しているメモリは各チャンネルとも32kBであり、1.2秒(32kB ×

Fig.2. The block diagram of the observing system.

40 μ s) のデータ長が一度に記録できる。

なお、1024個のデータはその切り出し部分のデータがスペクトル特性に影響を与えることが少ないハニングウィンドウを用いてFFT解析を行っている。

4. 観測結果

中部大学超高層山岡観測所（岐阜県恵那郡、地磁気緯度 25° N）において、1986年12月31日より1987年1月15日まで、毎日13時00分より17時00分における昼間ホイッスラー、及び03時30分より05時30分における夜間ホイッスラーの連続観測を行った。Fig.3 に1987年1月12日13時00分に到来した昼間ホイッスラー群の周波数スペクトルを示す。これらのホイッスラーは低緯度で観測される代表的なピュアトーン型ホイッスラーであり、かつ又、マルチフラッシュ型であること

Fig.3. An example of the frequency spectrum of daytime whistlers.

Fig.4. An example of the amplitude measurement of V_x and V_y .

Fig.5. An example of the measurement of phase difference between V_x and V_y .

よりその到来方向はほぼ同一と考えられる。なお、ホイッスラーの分散値はいずれも $3.0 \text{ sec}^{1/2}$ であり、昼間ホイッスラーとしては山岡において最も多く観測される分散値である。最初に到来したホイッスラー (W1) が周波数 3375 Hz を通過する 40 ms 間において、東西、南北ループアンテナに誘起する到来波の振幅と位相差をFFT解析で求めた例を以下に示す。

Fig.4 はFFT解析によって求められた各ループアンテナ出力の周波数特性例を示す。最初に到来したホイッスラー (W1) も後に到来したホイッスラー (W2) も東西、南北ループアンテナの出力はほぼ同一振幅比である。

また、Fig.5 に南北ループアンテナに対する東西ループアンテナ出力の位相差の周波数特性を示す。前のホイッスラー (W1) と後のホイッスラー (W2) の位相差は 90° を中心として $\pm 45^\circ$ 程度の変動が見られ、その変動状態もW1とW2では異なる。しかしながら、異なるホイッスラーの異なる周波数についての同様な解析により、最も強度が高い周波数においては、東西、南北ループアンテナに誘起するホイッスラー波の強度はほぼ同一振幅比であり、かつ又、位相差においては、南北に比べ東西ループアンテナの出力が 90° 進むことが確かめられた。このことから、これらのホイッスラーは右旋性円偏波で観測地点のほぼ真上より到来していることが容易に理解できる(太田 他, 1986)。

ホイッスラー (W1) において到来方向の周波数依存性を Fig.6 に示す。但し、ホイッスラーは非定常波であるため各アンテナ間の出力振幅比と位相差は各中心

周波数において $\pm 150\text{Hz}$ の帯域幅でトラッキングさせ平均化したものであり(岡田 他, 1978)、電離層の高さを 80km と仮定し、式 (6) より求まる方位角 θ と入射角 i より電離層下降透過点を示したものである。

ホイッスラーは観測地点のほぼ真上より到来しており、ホイッスラーの電離層下降透過点の周波数依存性が極めて少ないことを示している。このホイッスラーの到来方向には何れも式 (7) で示される誤差が存在する。擬似アンテナを用いた装置の較正により V_x 、 V_y 、 V_z の測定レンジ 0.2V に対し最大測定誤差は

$$\Delta V_x = \Delta V_y = \Delta V_z = \pm 0.002\text{V}$$

$$\Delta \phi_x = \Delta \phi_y = \Delta \phi_z = \pm 1^\circ$$

(9)

以内である。よって、Fig.6 に Fig.6. Frequency dependence of ionospheric exit points of a particular whistler. においては各周波数の電離層下降透過点を中心として最大半径 2km

km の測定誤差を含む。これらの測定誤差を考慮しても、到来方向に周波数依存性の少ないことは明らかであり、到来したホイッスラーがダクト伝搬によるものであることを示している (Hayakawa, 1978)。

Fig.3 で示されるホイッスラー (W1) について、式 (6) で与えられる偏波パラメータ u 、 v の周波数依存性をそれぞれ Fig.7 と Fig.8 に示す。但し、周波数は Fig.4 の場合と同様に各中心周波数において $\pm 150\text{Hz}$ の帯域幅で平均化したものである。偏波パラメータ (u , v) は $u=0 \pm 1$ 、 $v=1 \pm 0.5$ の範囲で、緩やかな変動のみを示している。そして、その平均は $u \approx 0$ 、 $v \approx 1$ に近いことより右旋性円偏波を中心として円偏波に極めて近い右旋性楕円偏波の範囲以内で揺らぎが見られるのみである。これら偏波パラメータ (u , v) の特性は、以前岡田ら (1979)、及び太田ら (1986) が自動観測で求めた結果とよく一致している。

この観測期間中検出された S/N の良好な 20 個の昼間ホイッスラーにおける到来方向と偏波特性の周波数依存性はそれぞれ Fig.6、及び Fig.7、Fig.8 とほぼ同一傾向を示しており、ホイッスラーの到来方向と偏波特性の周波数依存性は

13:00 (LT) Jan. 12, 1987
(YAMAOKA)

13:00 (LT) Jan. 12, 1987
(YAMAOKA)

Fig.7. Frequency dependence of u.

Fig.8. Frequency dependence of v.

見られなかった。これらの観測結果は従来より我々が求めた自動観測による解析結果を強く支持しているものである (Hayakawa et al., 1985; 太田 他, 1986)。

5. むすび

ホイッスラー到来方向と偏波特性の周波数依存性を求めるため、低緯度の山岡 (地磁気緯度 25° N) において、PCMレコーダを用いた昼間ホイッスラーと夜間ホイッスラーの連続観測を行った。PCMレコーダに記録されたホイッスラー波の水平磁界二成分と垂直電界一成分の振幅比と位相差をFFT解析で求めることにより広周波数帯域におけるホイッスラーの到来方向を求めた。その結果、山岡において観測された昼間ホイッスラーの到来方向は何れも観測地点の近傍より到来しており、到来方向と偏波特性は周波数依存性の少ないことが明らかとなった。

これらの観測結果は従来我々が求めた狭周波数帯域での自動観測による解析結果から推定してきた結論を直接的に証明したものである (Hayakawa et al., 1985; 太田 他, 1986)。また、観測期間における夜間ホイッスラーは到来したホイッスラーの強度が極めて弱いため、雑音レベルまで低下し、ホイッスラーの到来方向を正確に求めるのが困難であった。しかしながら、中国武漢大学空間物理系との共同観測で行なった Zhanjiang (地磁気緯度 10° N) における夜間ホイッスラーでは山岡におけるこれらの観測結果とほぼ同一の傾向を示している。これら夜間ホイッスラーの細かな観測結果は現在解析途中であり、別の機会に報告したいと

考えている (Hayakawa et al., 1988)。

到来方向の測定は、単にホイッスラーの電離層下降透過点の測定のみならず V L F、及び E L F (Extremely Low Frequency) における電磁波の磁気圏波動の発生機構、及び伝搬機構や磁気圏プラズマダイナミックスの研究には不可欠な研究要素となっている (Helliwell et al., 1973)。ホイッスラーの到来波を平面波と仮定した従来の研究方法はホイッスラー波の電離層下降透過点、及びその広がりより推定されるホイッスラーダクトの径を測定するのに重要な役割を果たしてきた (Hayakawa et al., 1985)。しかし、最近における研究ではホイッスラーの到来波を単一平面波と仮定することが必ずしも充分でないと言う指摘もある (鈴木 他, 1987)。つまり、ホイッスラーの電離層下降透過点が観測地点よりかなり離れた遠方に存在する場合は、大地と電離層間の多重反射を考慮する必要がある (岡田 他 1979)、単一平面波の仮定が常に成り立つとは限らない。今後、大地-電離層間の多重反射を考慮した到来方向の測定法を研究したいと考えている。

謝辞．本研究は中部大学超高層山岡観測所において行なわれたものであり、電子工学科 三上 修教授、栗本計起助教授の御尽力に心より感謝する。また、観測結果について御助言を頂いた千葉大学 島倉 信助教授に深謝する。かつ又、有益なコメントを頂いた査読者に心より御礼申し上げる。

参考文献

- Hayakawa, M., Non-ducted two-hop whistlers in the inner plasmasphere deduced from rocket measurement, *Planet. Space Sci.*, 22, 638-642, 1974.
- Hayakawa, M. and Y. Tanaka, On the propagation of low latitude whistlers, *Rev. Geophys. Space Phys.*, 16, 111-123, 1978.
- Hayakawa, M., K. Ohta, and Y. Tanaka, Further direction finding evidence on ducted propagation of low-latitude daytime whistlers, *Res. Lett. Atmos. Electr.* 5, 35-46, 1985.
- Hayakawa, M., K. Ohta, S. Shimakura, J. S. Xu, Z. T. Bao, and B. X. Liang, A proposal for multi-stationed direction finding measurements of low - and equatorial-latitude whistlers in China, *Res. Lett. Atmos. Electr.*, 8, 31-35, 1988.
- Helliwell, R. A., *Whistlers and Related Ionospheric Phenomena*, p. 43, Stanford Univ. Press., 1965.
- Helliwell, R. A., J. P. Katsufakis and M. L. Trimpi, Whistler induced

- amplitude perturbation in VLF propagation, *J. Geophys. Res.*, 78, 4679-4688, 1973.
- 太田健次、江口博之、ホイスラ方向測定システムⅡ、中部大学工学部紀要、20, 35-40, 1984.
- 太田健次、ホイスラ到来方向の自動観測装置、信学論 (B), J67-B, 8, 869-876, 1984.
- 太田健次、江口博之、低緯度におけるホイスラ偏波特性の自動観測、信学論 (B), J69-B, 9, 967-975, 1986.
- Okada, T., A. Iwai, and M. Hayakawa, The measurement of incident and azimuthal angles and the polarization of whistlers at low latitudes, *Planet. Space Sci.*, 25, 233-241, 1977.
- 岡田敏美、森山伸一、岩井 章、ホイスラの2周波数方位測定装置とその観測結果、信学論 (B), J61-B, 12, 993-1000, 1978.
- 岡田敏美、早川正士、岩井 章、森山伸一、ホイスラの伝搬方向、偏波の測定における大地-電離層間内多重反射波の影響について、信学論 (B), J62-B, 10, 872-877, 1979.
- 岡田敏美、岩井 章、低緯度ホイスラの地上総合観測、信学論 (B), J62-B, 12, 1171-1178, 1979.
- Okada, T., A. Iwai, and M. Hayakawa, A new whistler direction finder, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 43, 679-691, 1981.
- Park, C.G., Whistlers, *Handbook of Atmospheric*, vol. II, pp. 32-53, CRC Press., 1982.
- Storey, L.R.O., An investigation of whistling atmospherics, *Phil. Trans. Roy. Soc.*, A246, 113, 1953.
- 鈴木弘喜、島倉 信、早川正士、F. Lefevre、太田健次、波動分布関数による磁気圏波動の電離層透過域測定、信学技報, A・P86-128, 7-12, 1987.
- Tsuruda, K. and K. Hayashi, Direction finding technique for elliptically polarized VLF electromagnetic waves and its application to the low latitude whistlers, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 37, 1193-1202, 1975.
- Walker, A.D.M., The theory of whistler propagation, *Rev. Geophys. Space Phys.*, 14, 629-639, 1976.

(Received March 20, 1989;
revised May 25, 1989;
accepted June 1, 1989.)