

低緯度におけるホイスラ到来方向の周波数依存性

太田 健次*, 田 茂**, 唐 存琛**, 馬場 清英*, 江口 博之*

The Frequency Dependence of the Exit Points of Whistler

Kenji Ota*, Mao Tian**, Cunchen Tang**, Kiyohide Baba*, and Hiroyuki Eguchi*

(Received April 15, 1987)

In order to study the propagation mechanism of whistlers 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 field-analysis direction finding method, based on the simultaneous measurement of two horizontal magnetic components, and one vertical field component.

The measurement is made at a specific point frequency around 5 kHz where the maximum energy is expected in the whistler spectrum. It is of great interest whether the results of direction of arrival and polarization, measured at the particular frequency, can be generalized to a wide frequency band.

The extension of our direction finding system to a wide frequency band, using the PCM recorder and FFT analyzer, is studied in this paper.

1. まえがき

ホイスラ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¹⁾。ホイスラの磁気圏内伝搬モードに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²⁾。主として地上で観測されるホイスラ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^{3), 4)}。ダクト伝搬の実験的証明にはホイスラ到来方向の周波数依存性を測定する必要がある⁵⁾。通常、ホイスラ到来方向の測定には直交ループアンテナと垂直アンテナに誘起する電磁界成

分による一点観測法が用いられている⁶⁾。電磁界解析法ではホイスラの特定期周波数の狭周波数帯域における到来方向、到来波の電界強度、及び偏波特性を求めているため、ホイスラの全周波数における各特性の変動は明らかにできない⁷⁾。

我々は以前、ホイスラの特定期周波数 5.0 kHz と 2.6 kHz におけるホイスラの上り方向と偏波特性を求め、ホイスラの上り方向がホイスラの周波数に依存しないことを示した⁸⁾。また、直交ループアンテナに誘起する到来ホイスラ波の水平磁界二成分よりホイスラの偏波特性が広い周波数範囲に亘り一定であることより、ホイスラの上り方向と偏波特性はホイスラの周波数に依存しないことを示した⁹⁾。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は求めることができなかった。

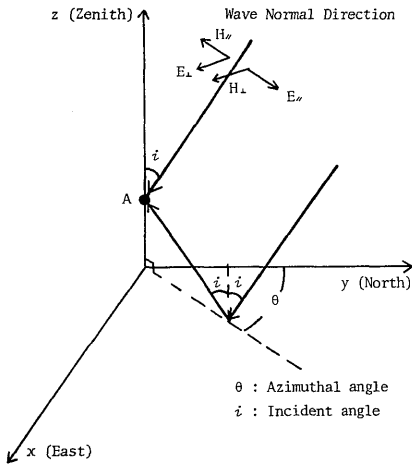
* 電子工学科 (Department of Electronic Engineering)

** 武漢大学空間物理系 (Department of Space Physics, Wuchan University)

今回, P C M (Pulse Code Modulation) レコーダと F F T (Fast Fourier Transform) 解析による広周波数帯域におけるホイスラ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一部を報告する。

2. 電磁界解析法によるホイスラ到来方向測定原理¹⁰⁾

第1図に示す観測座標系においてホイスラが入射角 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。入射面内の磁界成分を $H_{\parallel}$, 入射面に直行する磁界成分を $H_{\perp}$, 偏波パラメータ P を (u , v) とすれば (1) 式が定義できる。



第1図 ホイスラ到来方向の座標系

$$\left. \begin{aligned} H_{\perp} &= A_{\perp} \exp(j\omega t) \\ H_{\parallel} &= A_{\parallel} \exp(j(\omega t - \alpha)) \\ P &= H_{\parallel} / H_{\perp} = u - jv \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

但し, $A_{\perp}$, $A_{\parallel}$ はそれぞれの成分の振幅, 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スラ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バーティカル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 (2) 式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} V_x &= Y_x(\omega) \{ -(\sin\theta + u \cos i \cos\theta) \cos\omega t \\ &\quad - v \cos i \cos\theta \sin\omega t \} \\ V_y &= Y_y(\omega) \{ (\cos\theta - u \cos i \sin\theta) \cos\omega t \\ &\quad - v \cos i \sin\theta \sin\omega t \} \\ V_z &= Y_z(\omega) \{ \sin i \cos\omega t \} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

但し, $Y_x(\omega)$, $Y_y(\omega)$, $Y_z(\omega)$ は東西, 南北ループ, 及び, バーティカル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⁸⁾。

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} とすればホイスラ到来の方位角 θ と入射角 i は (3) 式で求められる。

$$\left. \begin{aligned} \theta &= \tan^{-1} \frac{M_{y-z} \sin \phi_{y-z}}{M_{x-z} \sin \phi_{x-z}} \\ i &= \sin^{-1} \frac{1}{M_{y-z} \cos \phi_{y-z} \cos \theta - M_{x-z} \cos \phi_{x-z} \sin \theta} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

また, 方位角と入射角の測定誤差は (3) 式よりそれぞれ $\Delta\theta$ と Δi で示される。

$$\left. \begin{aligned} \Delta\theta &= \frac{|\sin 2\theta|}{2} \left\{ \left| \frac{\Delta V_x}{V_x} \right| + \left| \frac{\Delta V_y}{V_y} \right| + \left| \frac{\cos \phi_{x-z} \Delta \phi_x}{\sin \phi_{x-z}} \right| + \left| \frac{\cos \phi_{y-z} \Delta \phi_y}{\sin \phi_{y-z}} \right| + \left| \left(\frac{\cos \phi_{x-z}}{\sin \phi_{x-z}} - \frac{\cos \phi_{y-z}}{\sin \phi_{y-z}} \right) \Delta \phi_z \right| \right\} \\ \Delta i &= \left| \frac{\sin^2 i}{\cos i} \left\{ \left| x \frac{\Delta V_x}{V_x} \right| + \left| y \frac{\Delta V_y}{V_y} \right| + \left| \frac{\Delta V_z}{V_z} (x - y) \right| + |\Delta\theta| (y \tan \theta + x \cos \theta) + |x \Delta \phi_x \tan \phi_{x-z}| + |y \Delta \phi_y \tan \phi_{y-z}| + |\Delta \phi_z (y \tan \phi_{y-z} - x \tan \phi_{x-z})| \right\} \right| \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

但し, x , y は

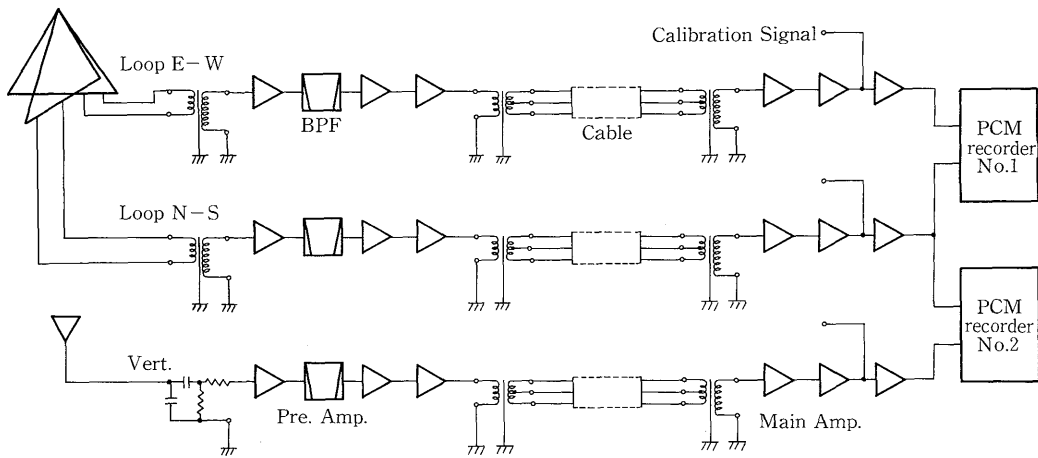
$$x = \frac{V_x}{V_z} \cos \phi_{x-z} \sin \theta \quad y = \frac{V_y}{V_z} \cos \phi_{y-z} \cos \theta$$

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。

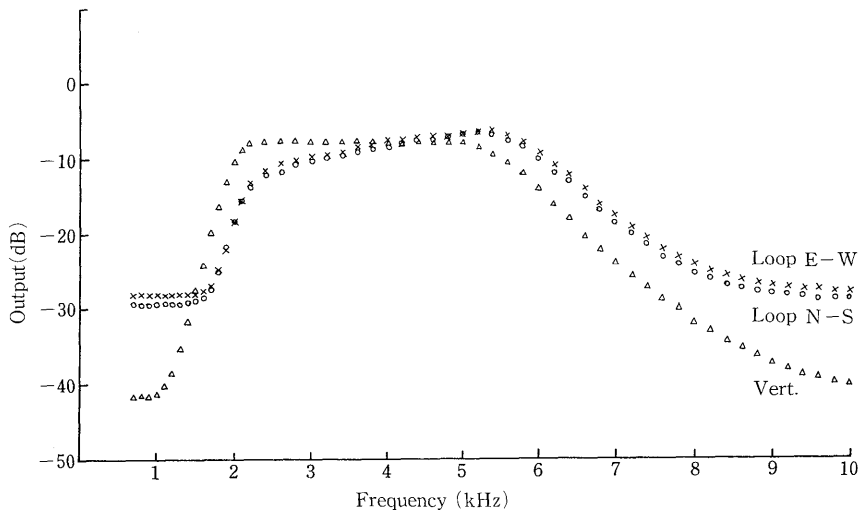
これらの誤差は F F T に附属する A/D (Analog to Digital) コンバータの特性及び θ と i の各数値により異なる。

3. P C M レコーダと F F T 解析によるホイスラ到来方向測定システム

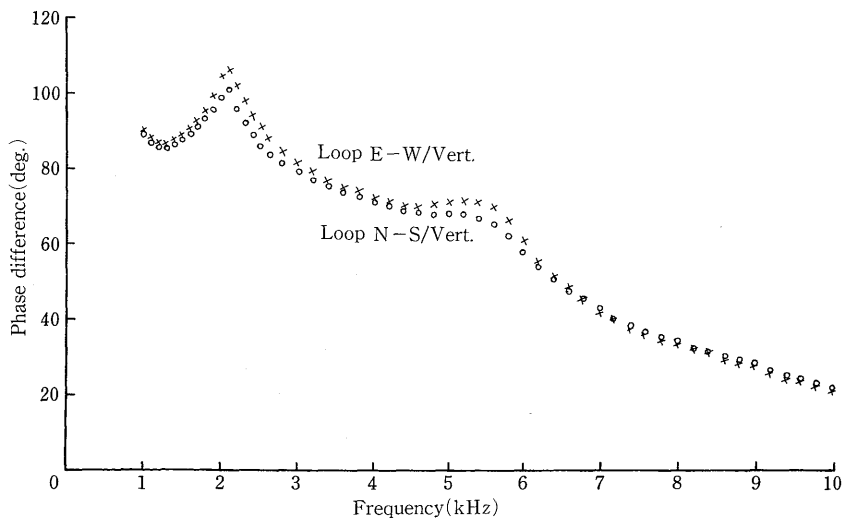
以前, 我々はホイスラ自動観測方式を用いてホイスラの到来方向を求めた¹¹⁾。このときは各アンテナに誘起したホイスラ波の振幅比と位相差をワンボードマイコンを用いてリアルタイムで求めるため, (2) 式における伝達関数 $Y(\omega)$ を同一特性にする必要性があった。しかし, P C M レコーダでホイスラの信号波を記録する場合においてはリアルタイム方式ではないので各アンテナの伝達関数は後に補正を行うことができる。第2図に P C M レコーダによるホイスラ到来方向の観測システムを示す。



第2図 ホイスラ到来方向の観測システム



第3図 観測装置の周波数特性



第4図 観測装置の位相特性

第2図において、各アンテナに誘起するホイスラ信号波は最大利得 80 dB の前置増幅器に導かれる。この増幅器には 6 kHz~2 kHz 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、100 m 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 40 dB である。主増幅器には FFT 解析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パーティカルアンテナの出力が記録される。これにより南北ループアンテナを基準とし、各出力信号波の振幅と位相差を知ることができる。

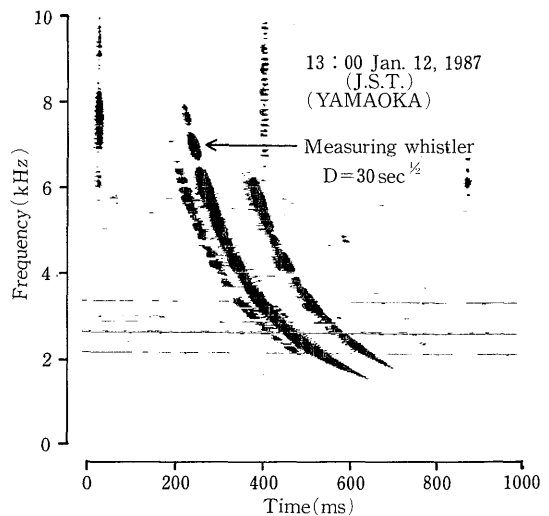
各 PCM レコーダの基準信号にパーティカルアンテナの出力を設定しないのは V_z に誘起する外来雑音のレベルが極めて高いためと、また、従来の観測においてホイスラの到来方向が観測地点の近傍に存在する 경우가多く、 V_z の出力が極めて弱い場合には直交ループアンテナの出力よりホイスラの偏波特性のみを求めるためである。擬似アンテナで較正した各出力の周波数特性を第3図に、また、 V_z に対する V_x , V_y の位相特性を第4図に示す。

各アンテナの出力は 4.0 kHz において同一利得となるように設定したが、南北ループアンテナの出力は 2 台の PCM レコーダに導かれているためやや利得が低くなっている。PCM レコーダに記録させたホイスラ信号波は 2 チャンネルの FFT 解析器により各信号波の振幅比と位相差が求められる。これらのデータには第3図と第4図に示される特性差を含むため、補正を行った後(3)式に代入して方位角 θ と入射角 i が求められる。

PCM レコーダより再生されたホイスラの信号波は 12 ビットの 2 チャンネル 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 $40 \mu\text{s}$ 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 25 Hz で 10 kHz の周波数までの振幅と位相が解析される。FFT 解析器に付属しているメモリは各チャンネルとも 32 kB であり $32 \text{ k} \times 40 \mu\text{s} = 1.2 \text{ 秒}$ のデータ長が一度に記録できる。1024 個のデータはその切り出し区間の始めと終わりの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

本大学超高山岡観測所(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 13 時 00 分より 17 時 00 分における昼間ホイスラ、及び 03 時 30 分より 05 時 30 分における夜間ホイスラ



第5図 昼間ホイスラの周波数スペクトル

ラの連続観測を行った。

第5図に1987年1月12日13時00分に到来した昼間ホイスラ群の周波数スペクトルを示す。これらのホイスラは低緯度で観測される代表的なピュートン型ホイスラであり、かつまた、マルチフラッシュ型であることよりその到来方向はほぼ同一と考えられる。なお、ホイスラの分散値は $30 \text{ sec}^{1/2}$ であり、昼間ホイスラ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。このホイスラが周波数 3375 Hz を通過する $40 \mu\text{s}$ 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。

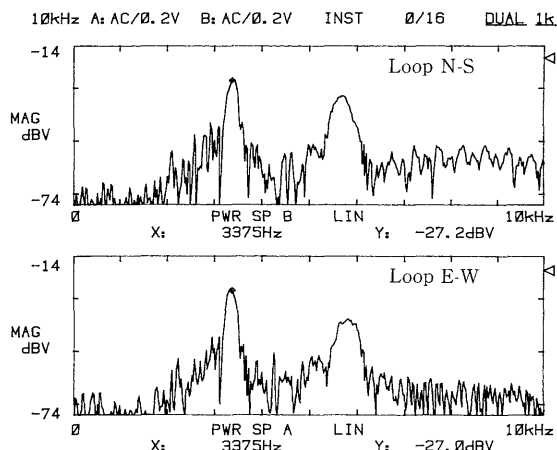
第6図は FFT 解析によって求められた各ループアンテナ出力の周波数特性例を示す。最初に到来したホイスラも後に到来したホイスラもほぼ同一振幅比である。

また、第7図に南北ループアンテナに対する東西ループアンテナの位相差の周波数特性を示す。前のホイスラも後のホイスラもその位相差はほぼ 90° である。

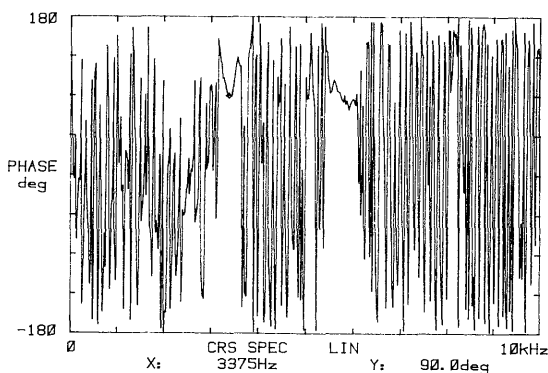
異なるホイスラの異なる周波数であっても東西、南北ループアンテナに誘起するホイスラ波の強度はほぼ同一振幅比であり位相は南北に比べ東西ループアンテナの出力が 90° 進むことより、これらのホイスラは右旋性円偏波で観測地点のほぼ上空より到来していることが容易に理解できる⁹⁾。

第5図において矢印で示されたホイスラの到来方向における周波数依存性を第8図に示す。但し電離層の高さを 80 km と仮定し(3)式より求めた方位角 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。

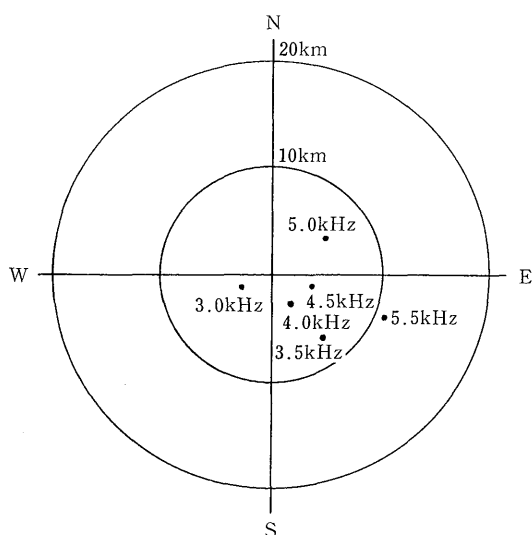
観測期間中に検出された夜間ホイスラは到来強度も弱くほとんどがディフューズしたホイスラであった。第9図に1月12日03時48分に到来した夜間ホイスラの周



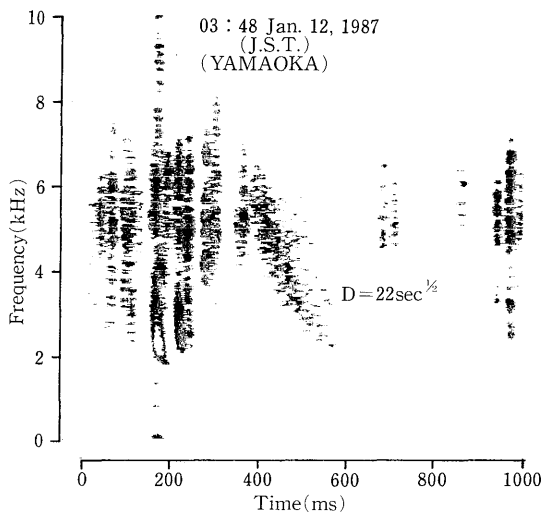
第6図 各ループアンテナの振幅解析例



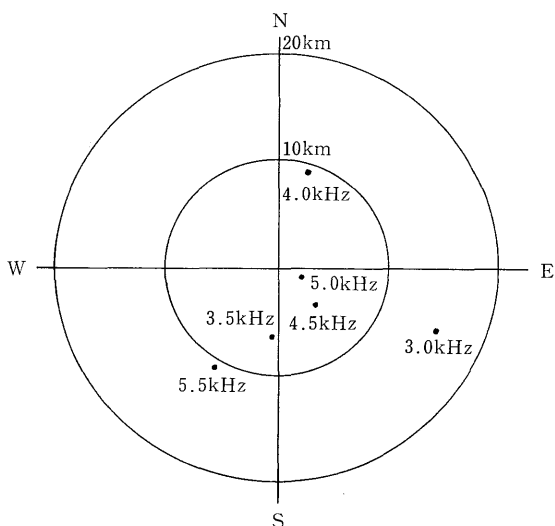
第7図 各ループアンテナの位相差解析例



第8図 到来方向の周波数依存性(昼間ホイスラ)



第9図 夜間ホイスラの周波数スペクトル



第10図 到来方向の周波数依存性(夜間ホイスラ)

波数スペクトルを示す。第8図の昼間ホイスラに比べディフューズしているため到来波の強度は弱い。ホイスラの分散値は $22 \text{ sec}^{1/2}$ であり夜間ホイスラとしては低緯度の山岡で観測される代表的な分散値である。

また、第10図に電離層高度を 80 km と仮定したこのホイスラの到来方向の周波数依存性を示す。

これらのホイスラの到来方向は何れも(4)式で示される誤差が存在する。第8図と第10図で示される電離層下降透過点の θ, i においては A/D コンバータの特性より V_x, V_y, V_z の測定レンジ 1 V に対し最大

$$\Delta V_x = \Delta V_y = \Delta V_z = 0.01 \text{ V}$$

$$\Delta \phi_x = \Delta \phi_y = \Delta \phi_z = 1^\circ \quad (5)$$

の測定誤差がある。よって第8図と第10図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5 kmの測定誤差を含む。これらの測定誤差を考慮しても、観測地点のほぼ上空よりホイッスルが到来していることは明らかであり、周波数依存性の少ないことを示している⁵⁾。

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観測結果を強く支持しているものである¹²⁾。

5. むすび

ホイッスル到来方向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ルと夜間ホイッスルの連続観測を行った。PCMレコーダに記録されたホイッスル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より広周波数帯域におけるホイッスルの到来方向を求めた。

その結果、山岡において観測された低緯度の昼間ホイッスルと夜間ホイッスル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の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自動観測による観測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^{8),9)}。また一般に夜間ホイッスルにおいては到来したホイッスルの強度が極めて弱いため、特にパーティカルアンテナの出力が雑音レベルまで低下し、ホイッスルの到来方向を求めるのが困難な場合が多い。しかしながら、FFT解析により各ループアンテナ出力の振幅比と位相差より興味ある観測結果が得られている。これら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。

到来方向の測定は、単にホイッスルの電離層下降透過点の測定のみならず VLF/ELF (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¹³⁾。ホイッスル到来波を平面波と仮定した従来の研究方法はホイッスル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ルダクトの径を測定するのに重要な役割を果たしてきた。しかし、最近における研究では、ホイッスル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¹⁴⁾。つまりホイッスル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¹⁵⁾、単一平面波の仮定が常に成り立つとは限らない。低緯度の山岡におけるホイッスル到来方向の測定では、観測地点の近傍にホイッスルの電離層下降透過点が存在しているがこれはパーティカルアンテナに誘起する商用電源の雑音レベルが極めて大き

いため S/N の良好なホイッスルのみを解析したためと思われる。雑音レベルの低い観測地点における到来方向の高精度測定においては入射角 i の大きなホイッスルも当然存在し、これらのホイッスルにおいては大地—電離層間による多重反射効果のファクタも計測が期待できよう。

7. 謝 辞

本研究は本学の特別研究費と特別研究旅費の御援助によるものであり、大学当局と電子工学科三上 修教授の御尽力に厚く感謝する。山岡での観測に当り御支援を頂いている栗本計起助教授、西脇 彰助教授に感謝する。また、本観測について多々御指導と御援助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と共に、観測結果について有意義な御助言を頂いた田中義人助教授、千葉大学島倉 信講師に感謝する。

参 考 文 献

- 1) Helliwell: "Whistlers and Related Ionospheric Phenomena", p.43, Stanford Univ. Press. 1965
- 2) Park: "Whistlers", Handbook of Atmospherics, vol. II, p. 21 1982
- 3) Walker: "The theory of whistler propagation", Rev. Geophys. Space Phys., 34, p.629 1976
- 4) Hayakawa and Tanaka: "On the propagation of low latitude whistlers", Rev. Geophys. Space. Phys., 16, p.111 1978
- 5) 木村, 松尾: "POGO衛星で観測されたVLF諸現象", IAS Yシンポジウム, p.109, 東大宇宙研 1969
- 6) Turuda, Hayashi: "Direction finding technique for elliptically polarization VLF electromagnetic waves", J. Atmos. Terr. Phys., 37, p.1193 1975
- 7) Okada, et al.: "A new whistler direction finder", J. Atmos. Terr. Phys., 43, p.679 1981
- 8) 太田, 江口: "ホイッスル方向測定システムII", 中部大学工学部 紀要, 20, p.35 1984
- 9) 太田, 江口: "低緯度におけるホイッスル偏波特性の自動観測", 信学論, J 69-B, 9, p.967 1986
- 10) Okada, et al.: "The measurement of incident and azimuthal angles.", Planet. Space Sci., 25, p.233 1977
- 11) 太田, 江口: "ホイッスル到来方向の自動観測装置", 信学論, J 67-B, 8, p.869 1984
- 12) Hayakawa, et al.: "Further direction finding evidence on ducted propagation of low-latitude daytime whistlers", Res. Lett. Atmos. Electr., 5, p.35 1985
- 13) Helliwell, et al.: "Whistler induced amplitude perturbation in VLF propagation", J. Geophys. Res., 78, p.4679 1973

- 14) 鈴木, 他: “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・P 86-128, p. 7 1987
- 15) 岡田, 他: “ホイスラの伝搬方向, 偏波の測定における大地一電

離層間内多重反射波の影響について”, 信学論, J 62-B, 10, p 872 1979