

ホイスラ到来偏波の自動観測

太田 健次*, 馬場 清英*, 江口 博之*

The Automatic Observation of Arrival Polarization of Whistler

Kenji Ota*, Kiyohide Baba*, and Hiroyuki Eguchi*

(Received April 11, 1986)

In order to study the propagation mechanism of whistlers, it is very important to measure their arrival direction and polarization. These measurements, however, are usually made in a narrow frequency band ($\Delta f \approx 400 \text{ Hz}$) around 5 kHz. The problem is to know whether or not the results of direction and polarization measured in the narrow frequency band can be generalized to a wide frequency band. A new equipment has been developed and described, which can automatically identify and track the whistler signal so that we can measure the amplitude and phase difference between two horizontal magnetic components of each whistler over a wide frequency band ($\Delta f \approx 3 \text{ kHz}$).

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内を伝搬し、対称半球へ到達する VLF 帯の電磁波である。ホイスラの伝搬群速度を V_g , 伝搬微小距離を ds とすれば、全伝搬通路 (path) での遅延時間 t は (1) 式で与えられる。

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

$$= Df^{-\frac{1}{2}} \text{ (sec)}$$

但し、 f はホイスラの周波数、 c は光速、 f_p はプラズマ周波数、 f_H は電子ジャイロ周波数であり単位はすべて MKS とする。

D の値 ($\text{sec}^{1/2}$) はプラズマ中の伝搬路の長さと、伝搬路における電子密度により決まる定数であり、分散値と呼ばれている¹⁾。ホイスラ伝搬路の決定にはホイスラが電

離層を下降透過する位置の測定が必要である。直交ループアンテナに誘起するホイスラ信号波の広周波数帯域における磁界成分の解析は、電磁界解析法によって求められる特定狭周波数帯域 ($f = 5 \text{ kHz}$ 近傍における $\Delta f = 400 \text{ Hz}$) でのホイスラ到来方向測定の精度評価に極めて重要であり、かつまた、ホイスラが電離層を下降透過し、観測地点へ到達するまでの伝搬過程を示す重要な鍵となっている²⁾。

Strangeways は 1980 年に、理想化されたモデル (均質、かつ、シャープな電離層下端境界、円偏波発生源) でのホイスラ到来方向の測定誤差について研究を行った。彼によれば、電離層下降透過点から観測地点までの電離層と大地間における多重反射波が到来方向の測定誤差を引き起こし、この測定誤差は周波数に対して極めて大幅に変動することを示した。よって、狭周波数帯域での電磁界解析法で求められたホイスラ到来方向測定結果は多重反射による測定誤差が評価されてないことを指摘した³⁾。特定一周波数から広周波数帯域への拡大による

*電子工学科 (Department of Electronic Engineering)

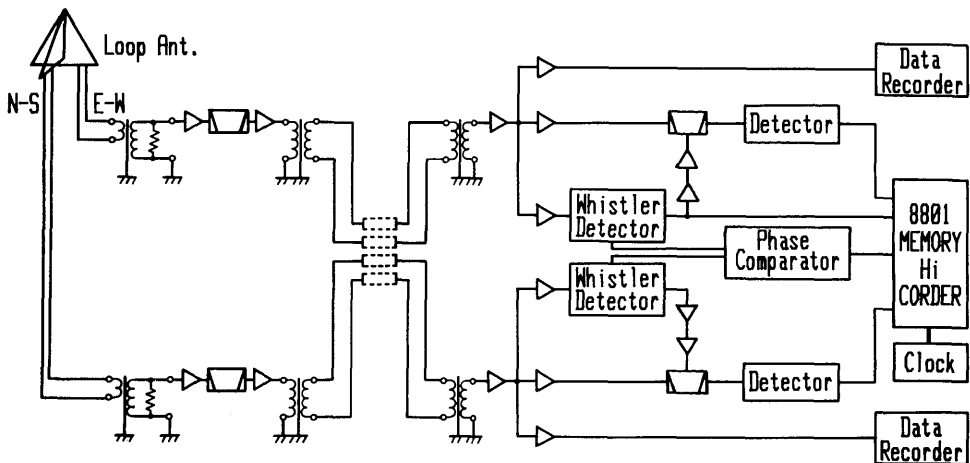
ホイスラ到来方向測定はこの問題の解明には不可欠なものである。異なる二周波数によるホイスラ到来方向測定はこの問題を解明する第一歩であるが、更に広周波数帯域での到来方向測定は、現状では経済的、技術的な問題を多々含んでおり、直ちに実行できない状況にある⁴⁾。しかしながら、直交ループアンテナに誘起するホイスラ到来波の水平磁界二成分で求められる伝搬特性における周波数依存性の解明はこの問題解決に極めて有効な手段であると考えられる⁵⁾。つまり、直交ループアンテナに誘起するホイスラ波の水平磁界二成分の振幅比と位相差がホイスラ周波数に関係なく一定であれば、ホイスラの到来方向と偏波特性はホイスラ周波数に依存しないと推定でき、電離層と大地間の多重反射による測定誤差は無視できるものであると考えることができる⁶⁾。大型計算機を用いたFFT解析によるホイスラ全周波数における水平磁界二成分の振幅比と位相差の微細な解析は現在開発されているが多数のホイスラを実時間で解析するホイスラの自動観測に適しているとは言えない²⁾。

これらの点に注目し、我々はPLL(Phase Locked Loop)を用いて到来ホイスラを自動検出し、ホイスラ信号波にPLLを同期させ、広周波数帯域に渡りホイスラ信号波の水平磁界二成分の振幅比と位相差を実時間で解析する装置を開発し、一部は既に報告している⁶⁾。今回は新たに改良した点と二年間に渡る観測結果について報告する。

2. 偏波自動観測装置の改良

第1図にホイスラ偏波特性の自動観測装置の全システムを示す。各部の細かな動作説明に付いては文献6)を参照されたい。

今回の改良点を以下に示す。



第1図 ホイスラ偏波特性の自動観測装置

a) モニタ用として使用していた端子にPCMデータレコーダを接続し、偏波自動観測装置における測定の再現性を検討するためホイスラ信号波を録音する。

b) PCM録音によって得たデータをFFT解析し、高精度なソナグラフ装置を開発する。

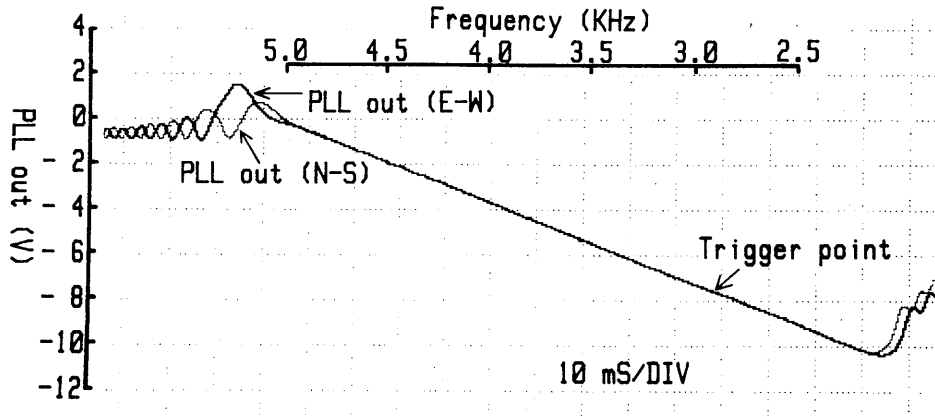
c) ループアンテナに誘起する到来波の振幅成分を取り出すための電圧同調フィルタ(NF製)を $Q=5(VT-2BP)$ より $Q=15(VT-1BP)$ に変更し、選択性を高める⁷⁾。

d) ループアンテナに誘起するホイスラ到来波の位相差測定部(MC 4044モトローラ製)を改良し、チャージポンプ回路を用いることにより位相差 $-360^\circ \sim +360^\circ$ まで一出力とする⁸⁾。

e) PLL(LM 565ナショナルセミコンダクタ製)の特性を揃えることにより、東西、南北ループアンテナに誘起するホイスラの入力周波数-出力電圧(以下 $(f-V)$ と記す)変換特性の記録方式を東西ループアンテナのみの1チャンネルとする。

f) 以上の改良により記録器(8801日置製)の入力には、東西ループアンテナにおけるPLLの $(f-V)$ 変換出力が1チャンネル、東西、南北ループアンテナに誘起する信号波の位相差出力が1チャンネル、各ループアンテナに誘起する信号波の振幅出力が2チャンネルの合計4チャンネルとなり、記録器は1台のみで測定可能とする。

記録器の各チャンネルには2Kワードのメモリが附属している。このメモリを利用し、メモリへの書き込みサンプル周期を $80\mu s$ に設定した場合、ホイスラ検出のトリガーパルスにより、ホイスラ検出以前の $1K\text{ワード} \times 80\mu s = 80ms$ とホイスラ検出以後の $1K\text{ワード} \times 80\mu s = 80ms$ の合計 $160ms$ の信号波形を記録可能とした。記録器における各出力の零点レベルと振幅率は任意



第2図 PLLの入力周波数－出力電圧変換特性の一例

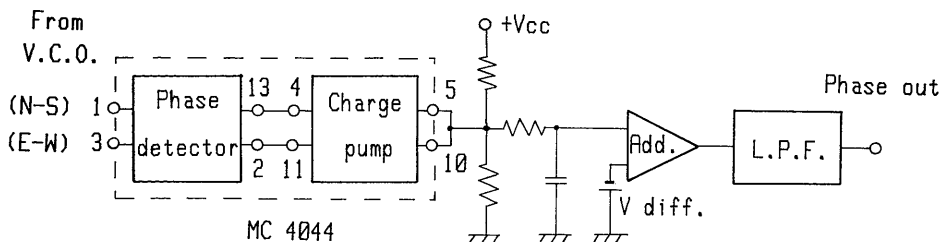
に設定でき、色調も濃淡が可変となっている⁹⁾。

第2図に東西、及び、南北ループ回路におけるPLLの(f -V)変換特性の一例を示す。各PLLの特性差によりキャプチャレンジ(Capture range)とロックレンジ(Lock range)は多少異なるが、両PLLがロックしている周波数範囲においては入力周波数と出力電圧変換特性が同一であり、直線性が良好であることを示している。PLLの自走周波数は5.0 kHzであり、入力信号波にPLLがトラッキング(tracking)できる周波数は5 kHzより2 kHzまでの帯域巾3 kHzとした。PLLの(f -V)変換特性において、出力電圧が-7.5 V以下になったとき、トリガーパルスを発生させ、記録器の作動開始信号として用い、ホイスラの自動検出を行っている¹⁰⁾。このトリガーパルスは時計回路とも連動しており、ホイスラ発生の日時が記録できる。PLLが入力信号波にロックしている状態においてはPLL内部のV.C.O. (Voltage Controlled Oscillator)の発振出力周波数と入力信号波の位相差は自走周波数において常に90°であり、入力周波数とこの位相差は直線関係にある⁹⁾。この直線性を利用し、東西、南北ループのV.C.O.発振出力間の位相差を測定することにより、東西、南北ループアンテナ

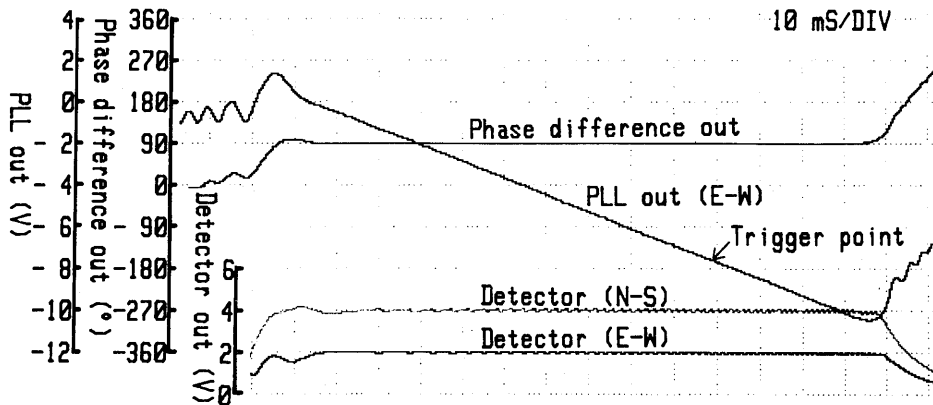
ナに誘起したホイスラ到来波の位相差を知ることができる。

MC 4044を用いた位相差測定部の構成図を第3図に示す。MC 4044の13 pinと2 pinの出力は位相差量に対応してデューティファクタ(Duty factor)の異なる方形波が出力される。但し、位相差量は、1 pinと3 pinに加えられる入力波の履歴特性により13 pin又は2 pinに出力される。このため、従来の位相差測定方式では13 pinと2 pinの両出力を常に記録する必要があった⁹⁾。今回はチャージポンプ(Charge pump)回路を用いることにより1出力とした。ただし、位相差が進み位相(0°~+360°)となるか遅れ位相(-360°~0°)となるかは入力波の履歴特性によって決まる⁹⁾。

東西、南北ループアンテナの出力波形の大きさを1:2とし、位相差を90°と設定した擬似信号での一例を第4図に示す。東西、南北ループのPLLが信号波に同期する周波数引き込み(Pull-in)過程の周波数とロックレンジから外れる周波数範囲においては振幅と位相差は大きく変動している。しかし、PLLがロックしている周波数範囲においては振幅と位相差は一定である。よって、PLLのV.C.O.出力より各ループアンテナに誘起する



第3図 位相差測定部の構成図



第4図 擬似信号波による全出力波形の一例

信号波の位相差が求められ, かつまた, PLLのD.C. Amp出力電圧で制御される電圧同調フィルタが入力信号波を捕捉しており, 検波出力で入力信号波の振幅成分が求められることが分かる。

3. 観測結果

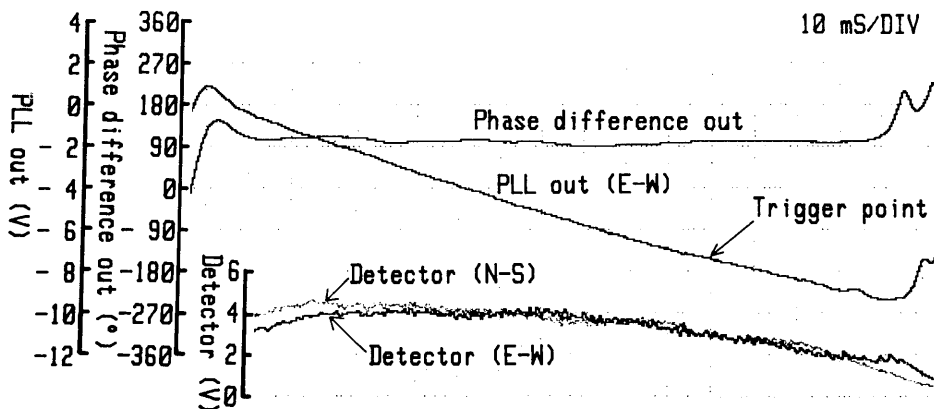
ホイスラ到来偏波の自動観測例を第5図に示す。また, そのホイスラの周波数スペクトルを第6図に示す。

通常, ホイスラの観測はホイスラ発生数の時間的変動と(1)式による分散値測定が基本となっている。分散値の測定にはソナグラフ解析装置(可聴周波数帯における一種の周波数分析機)が広く用いられている。ソナグラフ解析装置によって得られた時間軸一周波数軸におけるホイスラ分散値の曲線は単に分散値測定のみを行うのであればホイスラ分散値の自動観測で代行できる¹⁰⁾。

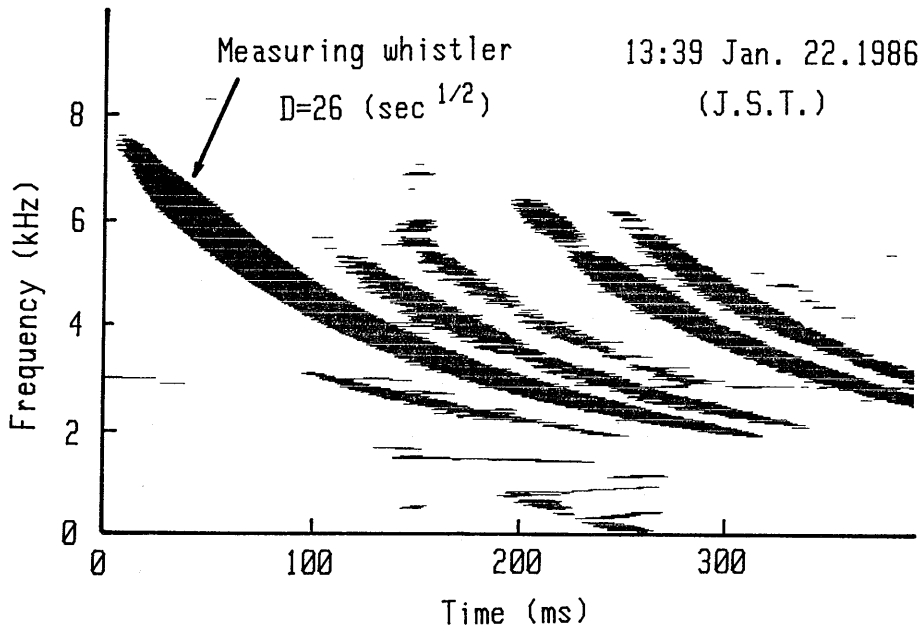
しかし, ソナグラフ解析の用途には

- a) 濃淡表示によるホイスラ到来強度測定
- b) ピュアトーン(Pure tone)ホイスラとディフューズ(Diffuse)ホイスラの識別
- c) ショート(Short)ホイスラ, ロング(Long)ホイスラ, マルチフラッシュ(Multiflash)ホイスラ, エコートレーン(Echo train)ホイスラ等の識別
- d) 電離層-大地間の多重反射伝搬による導波管伝搬の遮断周波数測定

など, 自動観測では知り得ないデータの解析法がある。我々はFFT解析を用いたソナグラフへの応用を試みた。第1図においてPCMデータレコードに録音されたホイスラ信号波を40 μ sのサンプルタイムでA/D変換し, 64 KBのメモリに波形を記録させる。メモリに記憶される時間は約2.5秒間であり, 通常のソナグラフと同一である。メモリに記録されたホイスラ信号波は最初の0番地より1023番地までのデータにより, 0 Hzより10



第5図 本装置により観測された出力波形の一例



第6図 ホイスラの周波数スペクトル

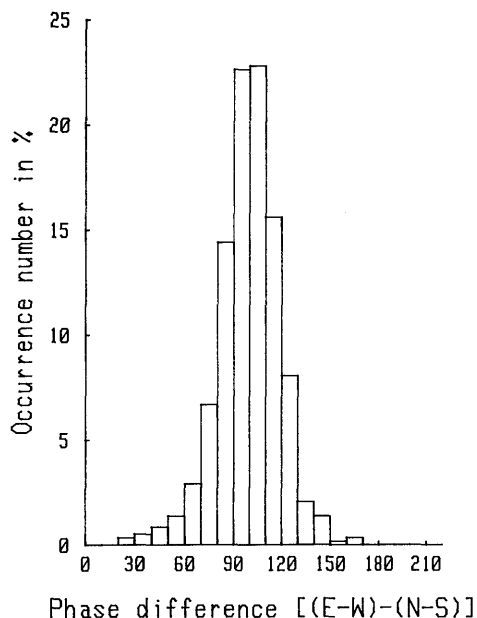
kHz までを、周波数分解能 25 Hz にて FFT 解析する。この計算結果を 640×400 ドットの CRT 上の左端下部 (0 Hz) より左端上部 (10 kHz) に、周波数分解能 25 Hz 毎における強度 (最大値、及び、最小値は任意に設定可能) をカラー別で表示する。つぎに 16 番地 (任意設定可能) を移動させ、16 番地より 1039 番地までを FFT 解析し、CRT 上の左端下部を 1 ドット右へ移動させ同様に表示させる。CRT の画面に全て表示した後、プリンタにてハードコピーを取る。第6図における周波数スペクトルが FFT 解析によって得られた一例である。

第5図において、東西、南北ループアンテナに誘起した信号波の検波出力は緩やかな変動のみを示しており、ほぼ同振幅である。また、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も変動は緩やかであり、約 90°進むことから右旋性円偏波のホイッスラであると推定できる。そして、PLL がホイッスラにロックしている 5 kHz~2 kHz の周波数範囲において、振幅比、位相差とも変動は少なく、到来方向と偏波特性の周波数依存性が少ないことを示している。第6図に示すホイッスラの周波数スペクトルにおいて検出されたホイッスラの前には別のホイッスラも到来している。しかし、第5図の PLL 出力電圧は検出されたホイッスラの ($f-V$) 変換特性のみを出力しており、振幅比と位相差の出力は他のホイッスラに影響されないことを示している。なお、これらの観測結果は PCM データレコーダによる偏波自動観測装置の動

作試験で再現性が確認されている。

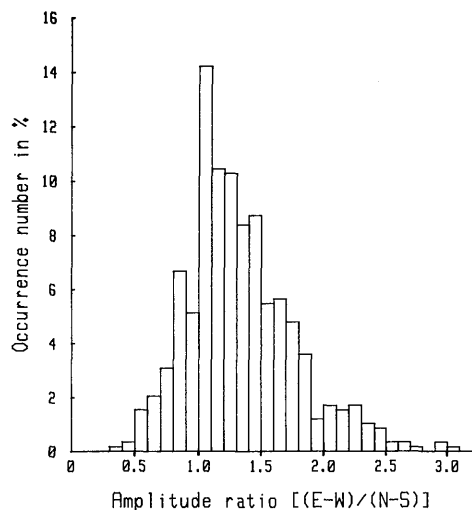
1985 年 12 月より 1986 年 2 月までの連続観測における東西、南北ループアンテナに誘起したホイッスラ信号波における位相差の発生頻度分布を第7図に示す。東西、南北ループアンテナに誘起したホイッスラ信号波の位相差は 80°~120°に全体の 7 割以上が存在し、90°~110°にピークがある。アンテナ系も含めた全システムの測定誤差が最大 ±10°含まれていることから、発生数の最も多い位相差は 80°~120°に存在しているものと考えられる。また、東西、南北ループアンテナに誘起したホイッスラ信号波における振幅比の発生頻度分布を第8図に示す。

振幅比の最大発生頻度は 1.0~1.1 にあるが 1.0~1.5 に広く分布している。これらのことから右旋性円偏波に近いホイッスラが多いことが推定できる。しかしながら、測定誤差を考慮してもなお、円偏波からかなりはずれた楕円偏波のホイッスラも到来しているものと考えられる。これらの測定結果は 1984 年 12 月~1985 年 2 月における観測結果と全く同一であり、電磁界解析法による狭周波数帯域で測定した偏波特性を補足している。低緯度の山岡におけるホイッスラ到来方向の測定結果では、ホイッスラ発生頻度がガウス状分布をなしているホイッスラ群は概ね観測地点のほぼ上空より到来しており、単一ダクトを伝搬したホイッスラ群であると推定できることはすでに示した¹¹⁾。よって、観測地点のほぼ上空より到来したホイッスラは電離層と大地間における多重反射の影響が極



第7図 位相差の発生頻度分布

めて少ないものと考えられる。それ故、東西、南北ループアンテナに誘起されるホイスラ信号波の位相差と振幅比はほぼ一定であり、ホイスラ周波数による依存性が少ないものと考えられる。つまり、低緯度ホイスラの到来方向と偏波特性はホイスラ周波数に依存する割合は少ないことを示しており、電磁界解析法によって求めた狭周波数帯域におけるホイスラ到来方向と偏波特性はホイスラの広い周波数範囲において、ほぼ一定であると推定できることを示した。



第8図 振幅比の発生頻度分布

4. むすび

電磁界解析法で求めた狭周波数帯域でのホイスラ到来方向と偏波特性がホイスラの広い周波数帯域において成立することを示すため、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と振幅比の自動観測装置を開発し、また、その改良を行った。本装置を用い、超高層山岡観測所（地磁気緯度 25°N ）において1984年12月～1985年2月、及び、1985年12月～1986年2月にホイスラ偏波特性の自動観測を行った。

両観測期間における測定の結果、低緯度におけるホイスラの到来方向と偏波特性は広いホイスラ周波数においてほぼ一定であり、周波数依存性の少ないことを示した。この結論は、狭周波数帯域におけるホイスラの到来方向が観測地点のほぼ上空にあり、電離層と大地間における多重反射の影響が少ないと推定される従来の観測結果と極めて良く一致している。PLLを用いた偏波特性の自動観測装置はホイスラの解析周波数帯域を2 kHz～3 kHzにまで広げ、長期間の自動観測が可能である。しかしながら、直交ループアンテナに誘起するホイスラ信号波をPLLがロックする状態を利用するため、各ループアンテナに誘起するホイスラ信号波でPLLがロックできない微弱なホイスラ、及び、周波数変化が大きい微少分散値（ $15\text{sec}^{1/2}$ 以下）のホイスラについては解析不能となる。

今後の課題として、PCMデータレコーダと大型計算機を用いたFFT解析による全ホイスラ周波数における到来方向と偏波特性のより詳細な解析が必要となろう。

5. 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、大学当局と三上 修主任教授の御尽力に厚く感謝する。山岡での観測に当たり御支援を頂いた栗本計起助教授、西脇 彰助教授に感謝する。また、観測装置の改良に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、岡田敏美博士、千葉大学島倉 信講師に深謝する。

文 献

- 1) R. A. Helliwell : "Whistlers and related ionospheric phenomena", p.43, Stanford Univ. Press, 1965
- 2) 岡田, 田中, 早川, 島倉 : "ホイスラの伝搬距離と偏波特性", 信学論(B), J 66-B, 11, p.1355, 1983
- 3) Strangeways : "Systematic errors in VLF direction finding of whistler ducts", J. Atmos. Terr. Phys., 42, 995, 1980
- 4) 太田, 江口 : "ホイスラ方向測定システム I", 中部大学工学部紀要, 20, 35, 1984
- 5) 島倉, 太田, 早川, 岡田, 田中 : "ホイスラの偏波特性", 324,

昭 59 電気関係東海支部大会論文集

- 6) 太田, 江口: “低緯度におけるホイッスラ到来方向と偏波特性”, 中部大学工学部紀要, 21, 27, 1985
- 7) “電圧同調フィルタ VT シリーズマニュアル”, エヌエフ回路設計ブロック, (1983)
- 8) 角田: “PLL の基本と応用”, 90, 東京電気大学出版局, 1978
- 9) “8801 メモリハイコーダ取扱説明書”, 8, 日置電機 (1894)
- 10) 太田, 江口: “PLL を用いたホイッスラ分散値の自動計測”, 信学論, 59-B, 10, 506, 1976
- 11) M. Hayakawa, K. Ohta, and Y. Tanaka : “Further direction finding evidence on ducted propagation of low-latitude daytime whistlers”, Res. Lett. Atmosph. Elect., 5, 2, p.35 (1985)