

ホイ斯拉方向測定システム

太田 健次*, 江口 博之*

The System of Direction Finding on Whistlers

Kenji Ota* and Hiroyuki Eguchi*

(Received March 31, 1982)

The group delay of whistlers is influenced by the number of electrons along the path of propagation; therefore, we must first fix the path. A new method for direction finding on whistlers using the PLL, A/D converter and microcomputer has been developed.

The advantages of using this method are as follows:

- 1) High accuracy numerical data of whistler waves are stored continuously in 56K byte memories.
- 2) It is only necessary to enlarge memories for prolongation of observation.
- 3) Economical observation without a data recorder is established.

The automatic observation of direction finding on whistlers was carried out at Yamaoka ($24^{\circ} 42'$ in geomagnetic latitude).

The results were satisfactory.

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 VLF 帯の電磁波である¹⁾。通常、ホイ斯拉観測はルーチン観測法によって行われ、ホイ斯拉発生数とホイ斯拉分散値の時間的変動を調べることに重点が置かれている。このデータにより、電離層及び磁気圏プラズマ中のホイ斯拉伝搬路における電子密度、伝搬路の生成と消滅などの物理情報を推定することができる²⁾。しかし、これら物理情報の推定はホイラス伝搬路の位置決定が基本条件となっている。本来ホイ斯拉観測に最も重要なホイ斯拉到来方向測定が未解決のままになっているのはホイ斯拉の発生そのものが突発性でかつ継

続時間の短いこと、周波数が低いこと、受信強度が一定でないことなどに原因がある。ホイ斯拉方向測定の試みは1956年、ゴニオメータを用いた Watts によって開始された³⁾。しかしゴニオメータによる方向測定は垂直直線偏波の場合は有効であるが、円偏波や楕円偏波の場合には偏波誤差が生ずる。すなわちホイ斯拉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透過点があったとき方向測定誤差が最も大きくなる。この欠点をなくするため1963年 Delloue らは多点観測法により解決した⁴⁾。しかしこの方式は伝送系を含めた測定装置の同一特性化に高度な技術を要し、多点観測のため観測経費も多くなる。他方1961年 Crary は直交2ループアンテナとパーティカルアンテナに誘起したホイ斯拉信号波の相対強度と相対位相を知ることにより一観測点でホイ斯拉の方向測定が可能であることを示した⁵⁾。それ以降各種

*電子工学科 (Department of Electronic Engineering)

の一点観測法が開発されているがいずれも観測地点に観測者が存在し、測定機器の操作、校正、記録用品の交換等が必要である^{6),7)}。

本学におけるホイスラ観測は超高層山岡観測所（地磁気緯度 24° ）で行われているが高緯度に比べホイスラ発生数が少なく、到来波の信号強度も弱い。我々は従来の到来方向測定方式を改良し、低緯度においても測定可能なホイスラ到来方向測定システムの開発を行ったので報告する。

2. ホイスラ到来方向測定原理

一点観測法による測定原理の概要を示す⁸⁾。

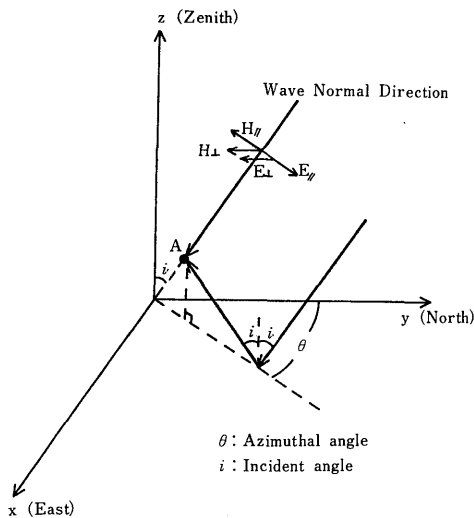
i) アンテナに誘起する磁界、電界成分を導く。

仮定1 大地は完全導体である。

仮定2 ホイスラは平面波で到来する。

仮定3 ホイスラは楕円偏波である。

仮定4 瞬時においてはホイスラは単一周波数である。



第1図 ホイスラ到来方向の座標系

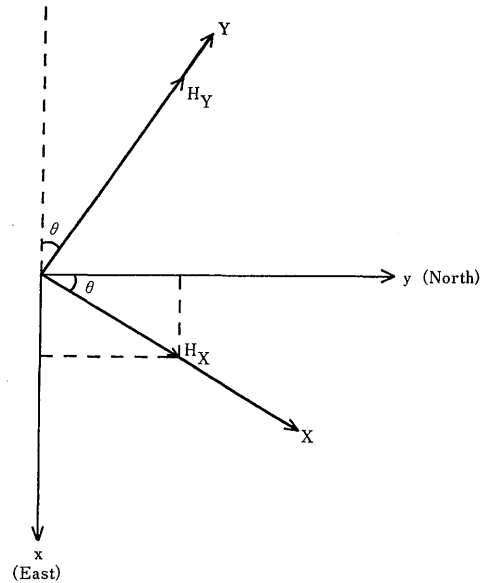
以上の仮定より第1図に示す座標系において入射角 i （天頂方向より測る）、方位角 θ （北側より時計方向に測る）の方向からホイスラ到来波が入射するものとする。ここで入射面に直角な磁界成分を持つ波と入射面に直角な電界成分を持つ波とに別け、それぞれの磁界成分をつぎのように定義する。（仮定2、仮定4）

$$\left. \begin{aligned} H_{\perp} &= A_{\perp} e^{j\omega t} \\ H_{\parallel} &= A_{\parallel} e^{j(\omega t - \alpha)} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

到来するホイスラ波は楕円偏波とし、その偏波パラメータ (u, v) をつぎのように定義する。（仮定3）

$$P = \frac{H_{\parallel}}{H_{\perp}} = u - jv$$

$$\therefore H_{\parallel} = H_{\perp}(u - jv) \quad (2)$$

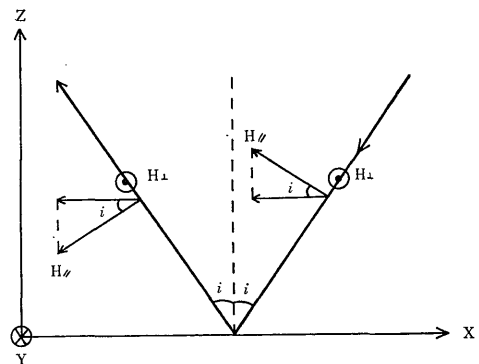


第2図 磁界成分の座標軸変換

第2図においてアンテナ（点A）に誘起する磁界成分を導く。 X, Y はホイスラの入射面を示し、 x, y はそれぞれ地球磁場上の東、北を示す。点Aに誘起する磁界は x 軸、 y 軸上に変換され

$$\left. \begin{aligned} H_x &= H_X \sin \theta - H_Y \cos \theta \\ H_y &= H_X \cos \theta + H_Y \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

となる。また大地は完全導体であるから、直接波と地表から反射する反射波を重ね合わせる。（仮定1）



第3図 直接波と反射波の磁界成分

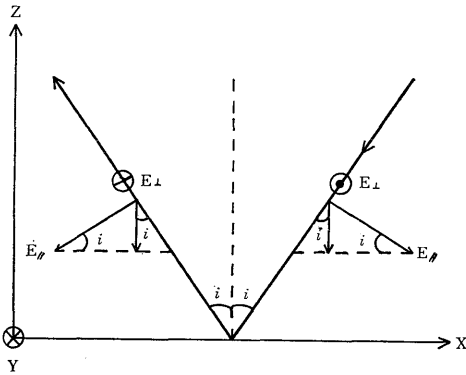
第3図より

$$\left. \begin{aligned} H_x &= -2H_{\perp} \cos i \\ H_y &= -2H_{\perp} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

となる。(3)式に(1)式、(2)式、(4)式を代入することにより

$$\left. \begin{aligned} H_x &= 2A_{\perp} e^{j\omega t} \{ (\cos \theta - u \cos i \sin \theta) + jv \cos i \sin \theta \} \\ H_y &= 2A_{\perp} e^{j\omega t} \{ -(\sin \theta + u \cos i \cos \theta) + jv \cos i \cos \theta \} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

つぎに第4図においてアンテナに誘起する電界成分を導く。



第4図 直接波と反射波の電界成分

直接波と反射波が相殺され各波の z 軸方向(天頂方向)成分のみが残る。(仮定1) によって電界成分 E_z は次式で示される。

$$E_z = -2E_{\perp} \sin i \quad (6)$$

また入射ホイスラは平面波であるから (仮定2)

$$Z_0 = \frac{E_{\perp}}{H_{\perp}} \quad (7)$$

但し Z_0 は自由空間の特性インピーダンス

(1)式と(7)式を(6)式に代入し、 E_z は次式で与えられる。

$$E_z = -2A_{\perp} e^{j\omega t} Z_0 \sin i \quad (8)$$

そして第3図、第4図より明らかなように、 H_z 、 E_x 、 E_y は地表を完全導体としたためすべて零である。(仮定1)

(5)式の水平磁界成分 H_x 、 H_y は地磁気軸上に展張された南北ループアンテナと東西ループアンテナによりそれぞれ検出され、(8)式の垂直電界成分 E_z はパーティカルアンテナにより検出される。

ii) 到来方向(入射角 i 、方位角 θ) を導く

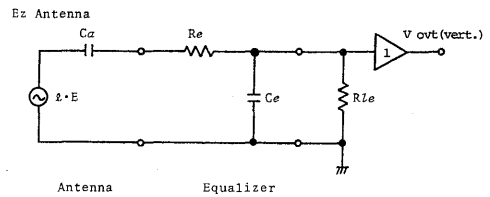
(5)式の H_x 、 H_y と(8)式の E_z は直交2ループアンテナとパーティカルアンテナで検出されるが、それぞれの最大電圧は次式で与えられる(単位は MKS)⁹⁾。

$$\begin{aligned} v_{x,y} &= -j\omega S_a N_a (4\pi \times 10^{-7} H) \\ &= -j\omega \frac{S_a N_a}{c} E \end{aligned} \quad (9)$$

$$v_z = IE \quad (10)$$

但し S_a 、 N_a はループアンテナの面積と巻数であり、 c は光の速度、 I はパーティカルアンテナの実効高を示す。(9)式と(10)式で明らかなように、各アンテナの利得及び周波数特性は異っている。この特性を描えるためにアンテナと前置増巾回路間に挿入するアンテナ結合回路はホイスラ到来方向測定で最も重要な部分である。最も簡単なアンテナ結合回路はパーティカルアンテナのみに挿入し、特定一周波数においてのみ(9)式と(10)式を等価するものである¹⁰⁾。しかし到来方向の周波数特性はホイスラの伝搬がダクト伝搬によるものか、ノンダクト伝搬によるものかを証明する重要な手掛り示すものである¹¹⁾。そこでホイスラ成分の存在する全周波数帯域で各アンテナの特性を同一化するアンテナ結合回路が各種開発された¹²⁾、¹³⁾。特に鶴田らはループアンテナとパーティカルアンテナに独自の結合回路を挿入し、各アンテナが同一伝達関数を持ったアンテナ回路網を作り出した。これはパーティカルアンテナのみに結合回路を挿入した方式に比べ一見不利と考えられるが素子数が少なく再現性が容易な利点を持っている。以下にその大要を示す¹²⁾。

第5図にパーティカルアンテナの等価回路とアンテナ結合回路を示す。



第5図 パーティカルアンテナの等価回路と結合回路

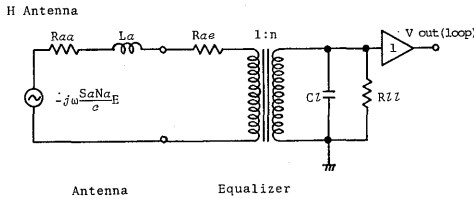
図より結合回路の出力電圧 $V_{out}(\text{vertical})$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} V_{out}(\text{vertical}) &= \left\{ \frac{j\omega C_a R_{Le}}{1 + j\omega \{ (C_a + C_e) R_{Le} + C_a R_e \} - \omega^2 C_a R_e C_e R_{Le}} \right\} \cdot IE \\ &= Y(\omega) v_z IE \end{aligned} \quad (11)$$

また第6図にループアンテナの等価回路とアンテナ結合回路を示す。図より結合回路の出力電圧 $V_{out}(\text{loop})$ は次式で与えられる。

$$V_{out}(\text{loop}) = \left\{ \frac{-j\omega n \frac{S_a N_a R'_{II}}{C\{(r_{aa}+r_{ae})+R'_{II}\}}}{1+j\omega \frac{L_a+C_l R'_{II}(r_{aa}+r_{ae})-\omega^2 \frac{L_a C_l R'_{II}}{(r_{aa}+r_{ae})+R'_{II}}} \right\} \cdot E = Y(\omega) \cdot L \cdot E \quad (12)$$

但し n はトランスの巻比で $C_l = n^2 C_l$, $R'_{II} = \frac{R_{II}}{n^2}$ である。



第6図 ループアンテナの等価回路と結合回路

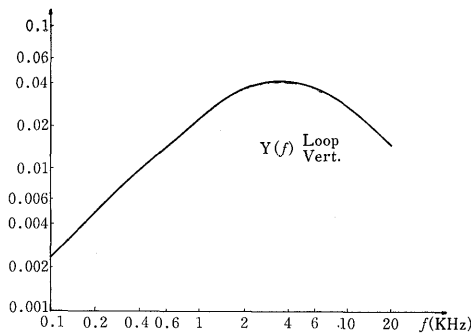
ここで (11) 式と (12) 式が同一特性を持つためには

$$Y(\omega) \cdot V_z = Y(\omega) \cdot L \quad (13)$$

であれば良い。(13) 式を満足させる各素子の定数設定例を示す。

$$\begin{aligned} l &= 6.3\text{m} & C_a &= 67.5\text{pF} & R_{Ie} &= 8.961\text{K}\Omega \\ R_e &= 539.7\text{K}\Omega & C_e &= 6337\text{pF} \\ L_a &= 0.126\text{mH} & r_{aa} &= 0.27\Omega & S_a &= 27.5\text{m}^2 \\ N_a &= 2 & r_{ae} &= 5\Omega & n &= 31.6 \\ R_{II} &= 10\text{K}\Omega & C_l &= 25000\text{pF} \end{aligned}$$

またこれらの定数において伝達関数 $|Y(f)|$ の周波数特性を第7図に示す。



第7図 伝達関数の周波数特性

東西、南北ループアンテナ及びパーティカルアンテナの結合回路後の出力電圧をそれぞれ V_x , V_y , V_z とすれば

$$V_x = -|Y(\omega)| I Z_0 H_y \quad (14)$$

$$V_y = -|Y(\omega)| I Z_0 H_x \quad (15)$$

$$V_z = |Y(\omega)| I E_z \quad (16)$$

となる。(14) 式, (15) 式, (16) 式の H_x , H_y , E_z に (5) 式, (8) 式を代入し, V_z に対する V_x , V_y の比を求めると

$$\frac{V_x}{V_z} = -\frac{\sin \theta + u \cos i \cos \theta}{\sin i} + j \frac{v \cos i \cos \theta}{\sin i} \quad (17)$$

$$\frac{V_y}{V_z} = \frac{\cos \theta - u \cos i \sin \theta}{\sin i} + j \frac{v \cos i \sin \theta}{\sin i} \quad (18)$$

となる。また V_z に対する V_x , V_y の振幅比を M_{x-z} , M_{y-z} とし, 位相差をそれぞれ ϕ_{x-z} , ϕ_{y-z} とすれば

$$\frac{V_x}{V_z} = M_{x-z} \cos \phi_{x-z} + j M_{x-z} \sin \phi_{x-z} \quad (19)$$

$$\frac{V_y}{V_z} = M_{y-z} \cos \phi_{y-z} + j M_{y-z} \sin \phi_{y-z} \quad (20)$$

(17) 式, (18) 式, (19) 式, (20) 式より入射角 i と方位角 θ は次式で与えられる。但し, 第6図のトランスを逆相接続した場合も考慮し, i に絶対値を用いてある。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{M_{y-z} \sin \phi_{y-z}}{M_{x-z} \sin \phi_{x-z}} \quad (21)$$

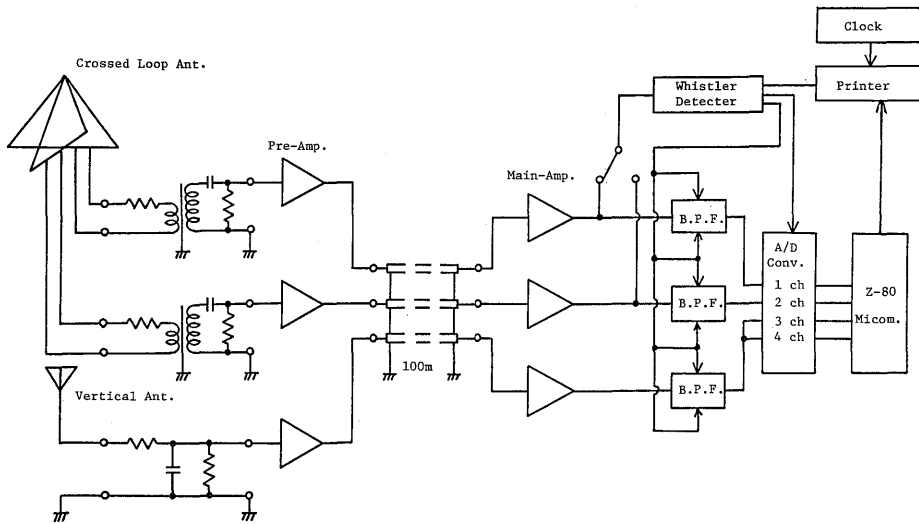
$$i = \sin^{-1} \frac{1}{|M_{x-z} \cos \phi_{x-z} \sin \theta - M_{y-z} \cos \phi_{y-z} \cos \theta|} \quad (22)$$

以上よりホイスラ到来方向は各アンテナ結合回路の出力端において, パーティカルアンテナに対する直交2ループアンテナの振幅比と位相差を知ることにより求められる。

3. ホイスラ到来方向測定システム

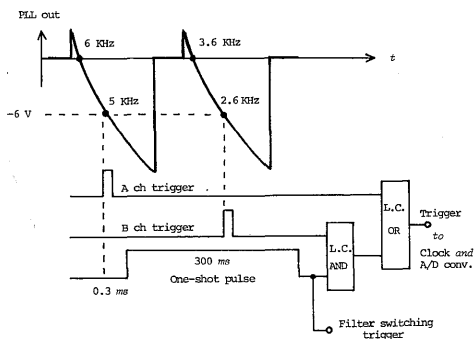
鶴田らは演算素子を用い, 各アンテナの出力信号を演算後 CRT 上に描かせ, その振幅及び傾きから到来方向を求めている¹²⁾。一方岡田らは CRT 上にリサーチ図形を描かせ, ビデオテープレコーダに録画し後にその図形を再生し到来方向を求めた¹⁰⁾。しかし後に, 鶴田らと同様の演算素子を用いた各出力信号を可聴周波数に変換し, 後にソナグラフで再生した各信号の周波数変動量を読み取り到来方向を求めている¹³⁾。これらの方式はつぎのような欠点がある。① 長期間の観測が行えない。② 演算素子を用いるため入力設定レベル以上のホイスラが到来した場合は測定できない。③ 測定数値が簡単かつ正確には読み取れない。④ ホイスラが到来しない時間帯でも記録機器は動作させておく必要がある。⑤ 自動観測が行えない。我々は1976年よりPLLを用いたホイスラの自動観測を行っているが, 到来方向測定にも自動観測を取り入れたいと考えている。

第8図にホイスラ到来方向測定システムを示す。アンテナ結合回路後の前置増幅部にはホイスラの周波数帯域



第 8 図 ホイストラ到来方向測定システム

のみを取り出すため 1 KHz～8 KHz の BPF が挿入された 50db～80db の利得可変形低雑音増幅器である。この増幅器を通った各アンテナ出力信号は 100m のケーブルで観測所の室内へ導かれる。この方式は VLF 帯の観測では常時使用され、アンテナに誘起する商用電源の誘導雑音を軽減する。その後、主増幅部において 20db～40db の増幅を行う。PLL を用いたホイストラ検出原理と BPF 切換原理を第 9 図に示す。

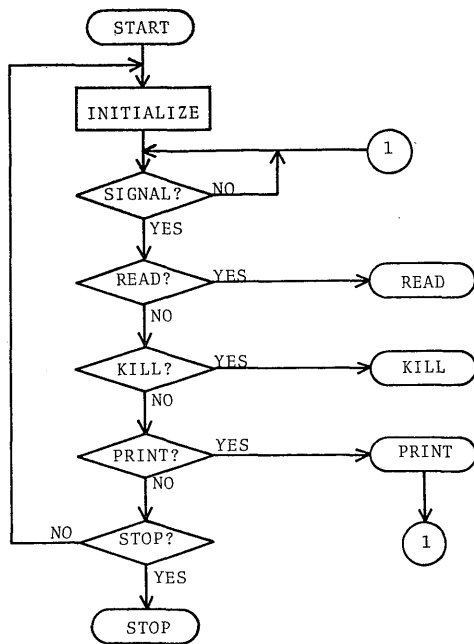


第 9 図 ホイストラ検出原理と BPF 切換原理

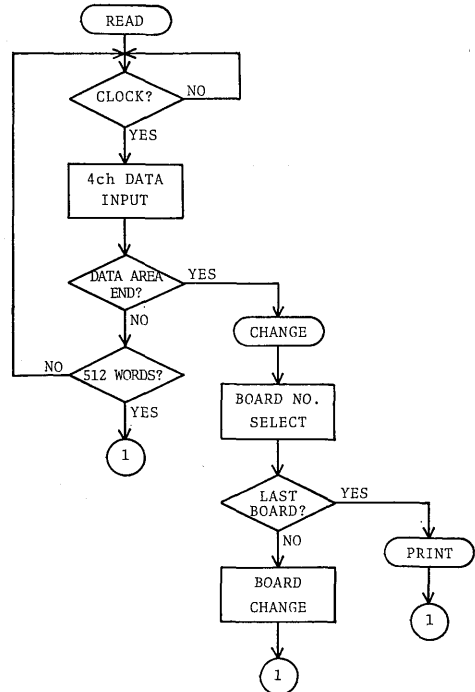
PLL ホイストラ検出器は自走周波数 6 KHz (Ach) と 3.6KHz (Bch) の 2 チャンネル PLL で基本構成されている¹⁴⁾。BPF は各アンテナ出力とも 5 KHz±200Hz と 2.6KHz±200Hz の並列 2 段になっている。通常は 5 KHz の BPF に接続されている。しかしホイストラが到来し、Ach の PLL 出力電圧が -6V を通過した 0.3ms 後にワンショットマルチバイブレータを動作さ

せ 300ms 間のみ 2.6KHz の BPF に切換えている。また Bch において、PLL 出力電圧が -6V の基準電圧を通過してもホイストラ検出のトリガパルスは発生しない。これは Bch のホイストラ検出パルスと BPF 切換のワンショットパルスとの積 (AND) を取っているためである。すなわち、2.6KHz のホイストラ信号をマイコンが記録したときそのデータのの前には必ず 5 KHz のホイストラ信号も記録されている。これら 5 KHz と 2.6KHz のデータは同一ホイストラであることを示す手法である。BPF を通過した信号の振幅は A/D コンバータで 00H から FFH までのデジタル量に変換される。変換速度は 2μs/word である。このコンバータは 4 チャンネルあり、1 チャンネルにつき 1024 ワードのメモリが附属している。このメモリを利用し、トリガが加えられる以前の最大 1024 ワード分をデータとして取り出せる。コンバータの入力レベルは 5 V で設定してあるが、4 ch 入力のみ 1 V の低入力レベルとしている。これはホイストラの電離層透過点がアンテナ設置場所の近傍に到来したとき (8) 式の i が小さくなり、その結果 (10) 式の V_z が小さくなる。この場合 3 ch のデータより 4 ch のデータを採用し、高精度の測定を可能にしている。

Z-80 を用いたマイコンは 0000 番地より DFFF 番地までの 56KB がデータエリア、E000 番地より EFFF 番地の 4 KB がワークエリア、F000 番地より FFFF 番地の 4 KB が観測プログラム及び I/O ポートとなっている。マイコンの I/O ポートは μPD8255 4 本構成されている。2 本が A/D 変換されたデータの入力と観



第10図 観測プログラムの主流れ図

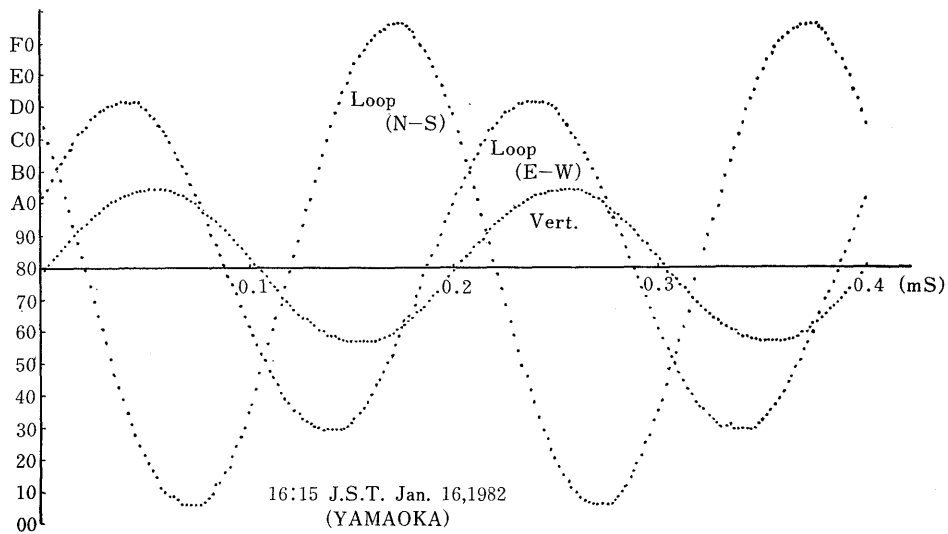


第11図 データ読み込みの副流れ図

測指令のキーボード入力に使用されている。マイコンに記憶されたデータをプリンタに印字させる出力とメモリボード切換出力に1本用い、残る1本は将来の拡張用となっている。観測プログラムの主流れ図を第10図に、データ読み込みの副流れ図を第11図に示す。

第10図においてイニシャライズはプログラムのスタックポインタを設定、 μ PD8255の入出力ポート指定、データエリアのクリア等を行っている。観測時においてA/Dコンバータは常に作動し、附属のメモリに順次データの書き込みを行っているがマイコン側には読み込まれない。ホイスラが到来しPLLの出力電圧が $-6V$ の基準電圧以下になったときトリガパルスが発生する。このパルスをリードシグナルとして、A/Dコンバータのメモリにあるデータを初めてマイコンのデータエリアへ取り込むことができる。各チャンネルともリードシグナルが発生する以前の1024ワードより始まり、その後の512ワード分をマイコンがデータとして取り込むプログラムとなっている。なおこれらのワード数は1024ワード以内なら任意に設定できる。第11図においてリードシグナルが発生したとき、A/Dコンバータメモリに記憶されている8ビットのデータを512ワード分だけ順次マイコンが読み込む。このタイミングを計るものがクロックである。クロックが発生するごとに4チャンネルのデータ

がマイコンのデータエリアに読み込まれ、各チャンネルとも512ワード分のデータが読み込まれたら観測に復帰する。1個のホイスラで4ch $\times$ 512ワードのメモリを必要とするため、56KBのデータエリアでは28個のホイスラデータを記憶できる。28個以上のホイスラが検出された場合はメモリボードを切換ることにより観測が続行される。現在は3枚のメモリボードを切換て最高84個のホイスラを連続検出し、データを記憶しているがメモリボードは任意に設定でき最大8枚まで増設できる。これらのメモリボードがすべて使用されたとき、自動的にプリントプログラムへジャンプし初めのメモリボードのデータから順にプリンタにより印字される。印字が完了した場合、メモリボードのデータエリアをクリアし、最初のメモリボードに切換後初期観測に復帰する。またプリントシグナルは毎日一定時刻に、自動的に発生できる。この時刻は1日2回まで設定できる。この場合印字する範囲は観測が進行したデータエリアまでであることは言うまでもない。観測者が観測室内に居る場合、観測装置に対して指令できるシグナルにはプリント命令、ストップ命令、スタート命令(第10図においてストップ以外のシグナルとして示してある)以外にキル命令がある。これは一度マイコンに記憶されたデータを後方よりホイスラ1個分(2KB)消去するものである。万一停電が発生



第12図 観測結果の一例

した場合はそれまで観測データは消えてしまうが、停電が終わった時点で自動的に初期観測に復帰する。

このホイスラ到来方向測定システムを用いて、1981年12月20日より1982年2月18日まで超高層山岡観測所において自動観測を行った。現在データを解析中であるので、ここではマイコンに記憶したデータから再現した各アンテナからの出力波形を第12図に示すにとどめる。

検出周波数は 5 KHz である。各ドットは $2\mu\text{s}$ 間隔の振幅を 8 ビットで表示し、512 ワードのデータ中 200 ワードをグラフにした。

$$M_{x-z}=2.1 \quad \phi_{x-z}=25.2^\circ$$

$$M_{y-z}=3.1 \quad \phi_{y-z}=144^\circ$$

各数値を (21) 式、(22) 式に代入し

$$\theta=64^\circ \quad i=21^\circ$$

が求まる。

4. むすび

PLL ホイスラ検出器、A/D コンバータとマイコンを用いた本システムはつぎに示す長所がある。

- ① 到来方向測定のシステムが単純であり、調整部分が極めて少ない。
- ② 入力が A/D 変換器の入力レベル以上であっても、レベル以内のデータより到来方向が求められる。
- ③ 各アンテナからの入力が A/D 変換器の入力レベル以内にある場合は各出力の最大振幅と振幅が 0 を切る (80H) 番地を知るのみで到来方向が求まる。
- ④ データがすべて数値化されており、他の装置を用いて複雑な読み取り作業を行う必要がない。

- ⑤ ホイスラが到来しない時間帯においては何も消費する記録物品がない。

- ⑥ データを印字するプリンタを除き可動部分が全くない。

- ⑦ ①、⑤ 及び ⑥ の結果として長期に渡る自動観測が可能である。

また今後の改良点として

- ① プリント指令によりデータを印字中の間、観測が中断されてしまう。

- ② 停電によりそれ以前に観測したデータはすべて消去されてしまう。

① についてはホイスラ発生数の少ない低緯度でもあり、メモリボードを増設しホイスラの発生数が稀な日中に印字することにより解消できる。しかし別の考え方として、観測データをすべて印字するのではなく 512 ワードのデータより方位角と入射角を求めるプログラム開発も考えられる。この方式を採用すれば印字する時間が大幅に短縮され、観測を中断する時間も極めて少なくなる。またデータをマイコンが読み込んだ直後に方位角、入射角が求まるとすれば、②の欠点も解消できるものと考えられる。今後は観測機器の改良とともに、これらの欠点を極力少なくするプログラム開発にも重点を置いて研究を進めたい。

5. 謝 辞

この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。またホイスラの観測はすべて超高層

山岡観測所で行ったものであり、米沢利之教授と栗本計起助教授に感謝する。またホイッスラ到来方向測定理論について多大な御助言を頂いた馬場清英講師に深謝する。

なお本観測機器の製作とプログラム開発には55年度卒業研究生築城敏実君、木下正俊君、56年度卒研究生小海尚昭君、水野幸彦君、桜井靖夫君、高木康典君、森田淑乃君の協力を得たことに謝意を表す。

文 献

- 1) Helliwell: "Whistlers and Related Ionospheric Phenomena", p. 1-10, 1966, Stanford Press
- 2) 太田, 江口: "地磁気擾乱時におけるホイッスラダクトの生成と消滅", 信号技報, A・P78-106
- 3) Watts: "Direction findings on whistlers", J. Geophys. Res., 64, 2029, 1959
- 4) Delloue et al.: "La polarization des sifflements radioelectriques.", C.A.Acad. Sci., 257, 1131, 1963
- 5) Cray: "The effect of the earth-ionosphere waveguide on whistlers", Tech. Report, 9, 1961, Radio Science Lab., Stanford Univ.
- 6) Cousins: "Direction finding on whistlers and related VLF signals", Tech. Report, 3432-2, 1972, Radio Science Lab., Stanford Univ.
- 7) Leavitt: "A frequency-tracking direction finder for whistlers.", Tech. Report, 3456-2, 1975, Radio Science Lab., Stanford Univ.
- 8) 岡田, 岩井: "ホイッスラ到来方向の測定", 信学論 B-35, 209, 1976
- 9) Watt: "VLF Radio Engineering", p. 401-410, 1967, Pergamon Press
- 10) 岡田, 岩井: "低緯度ホイッスラの到来方向及び偏波の測定", 信学技報, A・P74-67, 1974
- 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, 109, 1969, 東大宇宙研
- 12) Tsuruda, Hayashi: "Direction finding technique for elliptically polarized VLF electromagnetic waves", J. Atmosph. Terr. Phys., 37, 1193, 1973
- 13) 岡田, 森田, 岩井: "ホイッスラの 2 周波数方位測定装置とその観測結果", 信学論 B-61, 993, 1978
- 14) 太田, 江口: "ホイッスラの自動観測", 信学論 B-61, 553, 1978