

半導体化した Whistler 観測装置及び その自動計測装置の試作〔第1報〕

江 口 博 之* 栗 本 計 起**
馬 場 清 英*** 太 田 健 次****

Transistorized Observing Apparatus for Whistlers and a Recommendation of the Automatic Counting Equipment

Hiroyuki EGUCHI, Kazuoki KURIMOTO,
Kiyohide BABA, and Kenzi OTA

Since February, 1967 a preliminary observation of whistlers has been made as a part of work in the Research Institute of Magnetosphere, Chubu Institute of Technology. On this occasion we designed and installed a newly designed transistorized measuring equipments. We describe here details of these apparatus and some results of observation, but as the observatory is situated in low latitude, we could not get satisfactory results on account of limited chance of observation.

We recommend furthermore a scheme of automatic counting equipment which enables us to economize man-power in long term observation.

1. 序

1967年2月以来本学超高層研究所において、その一部門として Whistler の試験的観測を始め装置の整備を行ってきた。これらの装置は筆者らの設計により大部分を半導体化し小型にまとめ、将来観測項目の増加の際にも充分利用出来るように構成した。

Whistler 観測の装置の整備もほぼ完了し近く本観測を開始する予定であるので、ここに装置の細部にわたり記述しデーターの処理方法及び試験観測にて得られた Whistler の記録を報告すると共に、試験観測を通じて本研究所は地理的に低緯度にあるため Whistler の発生頻度が少なくルーチン観測のみでは良いデーターを得ることは困難であることが認められた。

従って連続観測の必要性が生じたが人的・経済的にも困難であるので自動計測装置の実験・設計を行った。その自動化するための技術的問題、特に Whistler の検出方式について第1報として報告する。

2. 空中線設置場所の選定

我国のような低緯度地方では Whistler の電界強度は極めて弱く $5\mu\text{V/m}$ ~ $80\mu\text{V/m}$ 程度であるので、これを受信する為には出来る限り人口雑音の少ない場所に空中線を設置しなければならない。そこで1966年8月と9月に本学構内において雑音電界の分布を測定し第1表の結果を得た。

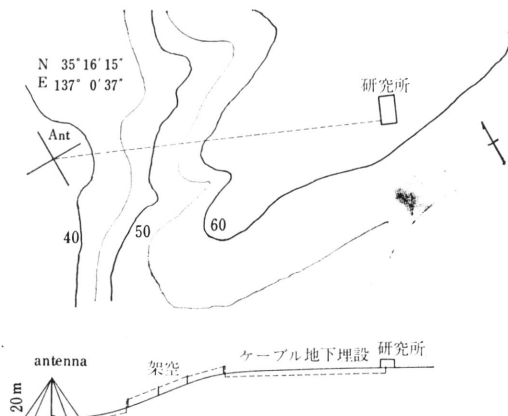
測 定 場 所	雑 音 電 界 強 度	
	N-S方向	E-W方向
ゴルフ練習所横	1.5mV/m	6.0mV/m
テニスコート横	0.5mV/m	2.5mV/m
グラウンド西側谷間	0.6mV/m	2.0mV/m

第1表 雑音電界分布
(但し数値は5kcによる校正平均レベル)

第1表からグラウンド西側谷間が最適であることがわかりここに空中線を設置することに決定した。

空中線地理座標	N 35°16'15"
	E 137° 0'37"
空中線磁気座標	N 24°36'31"
	E 203°11'28"

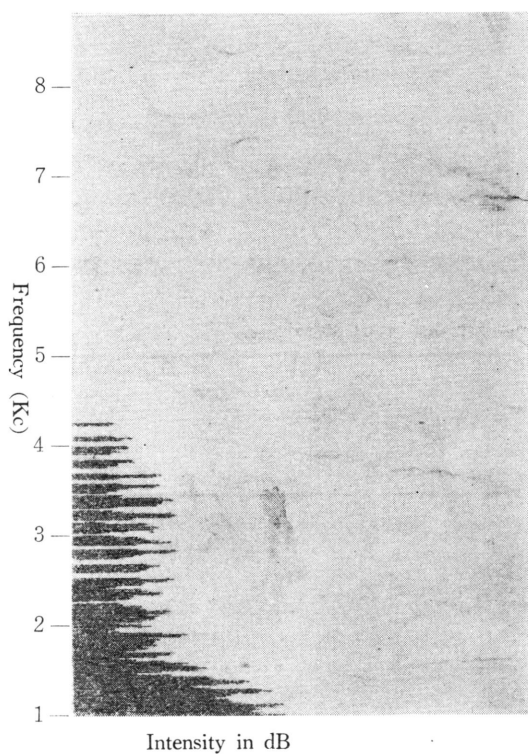
* 本学電子工学科助教授
** 〃 〃 助手
*** 〃 〃 〃
**** 〃 〃 〃



第1図 空中線設置場所

設置場所の見取図を第1図に示す。

この位置における雑音の原因は北方約800m及び西方約1000mを通る高圧送電線から生ずる電源周波数並びにその高調波成分でそのスペクトルは次2図に示すように4kc附近まで分布している。この外に長波帯通信の依佐美局(周波数17.442kc)による妨害が著しく、電界強度は約90dBあり後述のように前置増巾器の利得を20dB下げ更に主増巾器に帯域消去濾波器を挿入する結果となった。



3. Whistler 観測装置

観測装置は第3図のブロックダイアグラムに示したように空中線、前置増巾器、主増巾器、テープレコーダ、時刻信号発生器及び音声周波分析器(Sound spectrograph)から構成されている。尚、空電波形の観測も行えるように遅延増巾器とシンクロスコープも組込まれている。

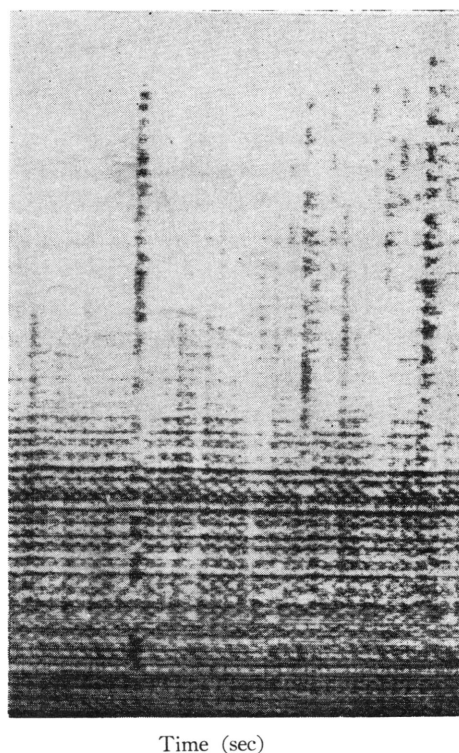
3.1 空中線

空中線は第4図のように高さ20m、底辺30mの直交三角棒型を用いそれぞれN-S、E-W方向に配置した。空中線のエレメントは3.5mm²ビニール被覆電線の2回巻きで計算による空中線実効高は10kcにおいて12.55cmである。

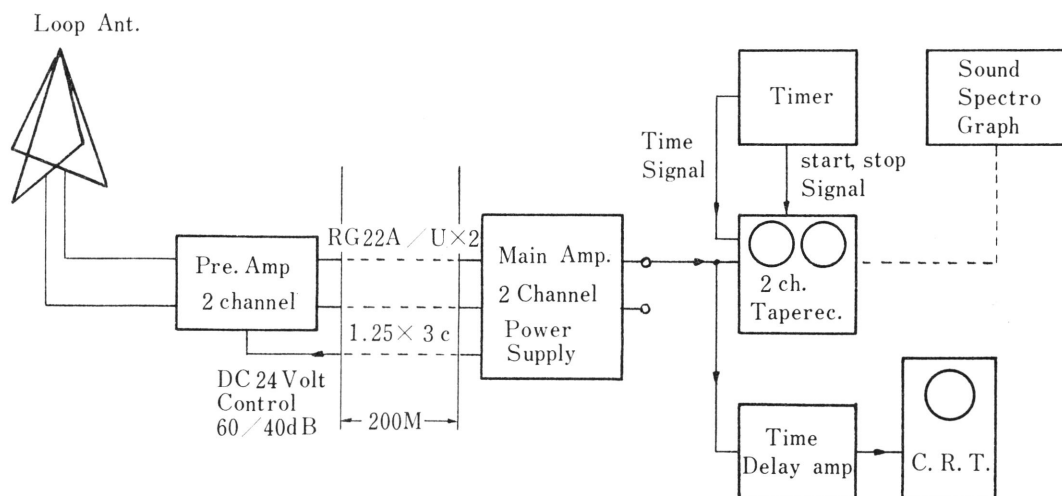
空中線の設置場所を標高差20mの谷間に選んだ理由は前述第2項の測定結果による他にWhistlerは地球磁界に沿ってほぼ直上から到来するので支障なく、地上波による妨害電波を軽減する点から有利であったからである。この様に空中線を谷間に設置したのは我国では最初でアメリカのコロラド州Boulderにあるだけである。

第2表に空中線の諸定数の測定結果を示す。

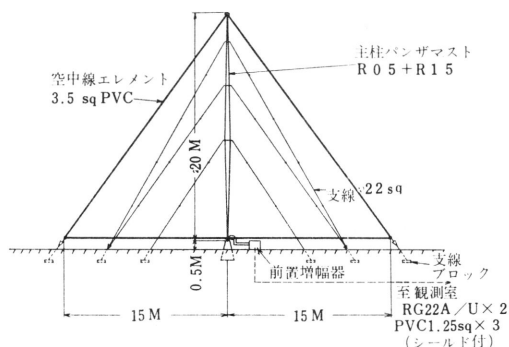
第2表からN-S、E-Wのエレメントに不平衡を生じているが現在のWhistler観測の場合はN-Sエレメン



第2図 雑音のスペクトラム



第3図 Whistler 観測装置ブロックダイアグラム



第4図 直交棒型空中線 $S=1/200$

トのみ使用するので支障はないが近い機会に修正する予定である。

3.2 前置増巾器

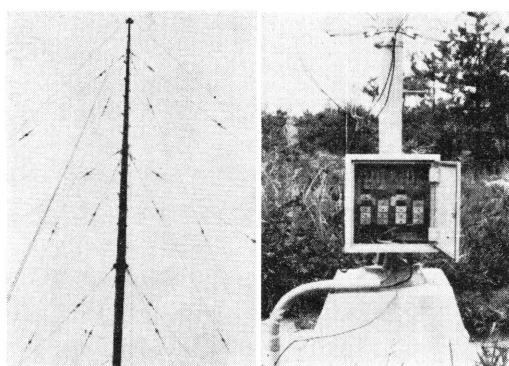
前置増巾器は空中線のN—S及びE—Wに対し2組使用し防水ケースに入れ空中線基部に設置した。回路図は第5図に示す。この回路は極低雑音化を計り更に広い Dynamic range で動作するように考慮して設計されたもので電源は約200m離れた観測所よりケーブルで供給され安定化回路を通し増巾利得の変動をさせている。

この利得は80dBに設計したが電源周波数の雑音及び近距離空電雑音によって回路が飽和するため20dBの減衰器を挿入し、更に観測所から遠隔操作により利得と帯域を切換使用出来るようにした。

利得40dBの場合 周波数範囲 100c/s~120kc/s

利得60dBの場合 同上 100c/s~11kc/s

利得60dBの場合高域遮断周波数を11kcとしたのは長波通信の妨害除去のためであるが Whistler の受信に

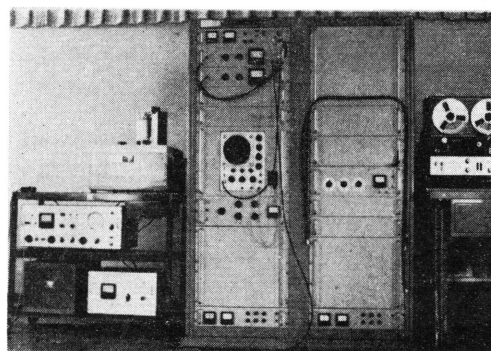


写真(1) 空中線

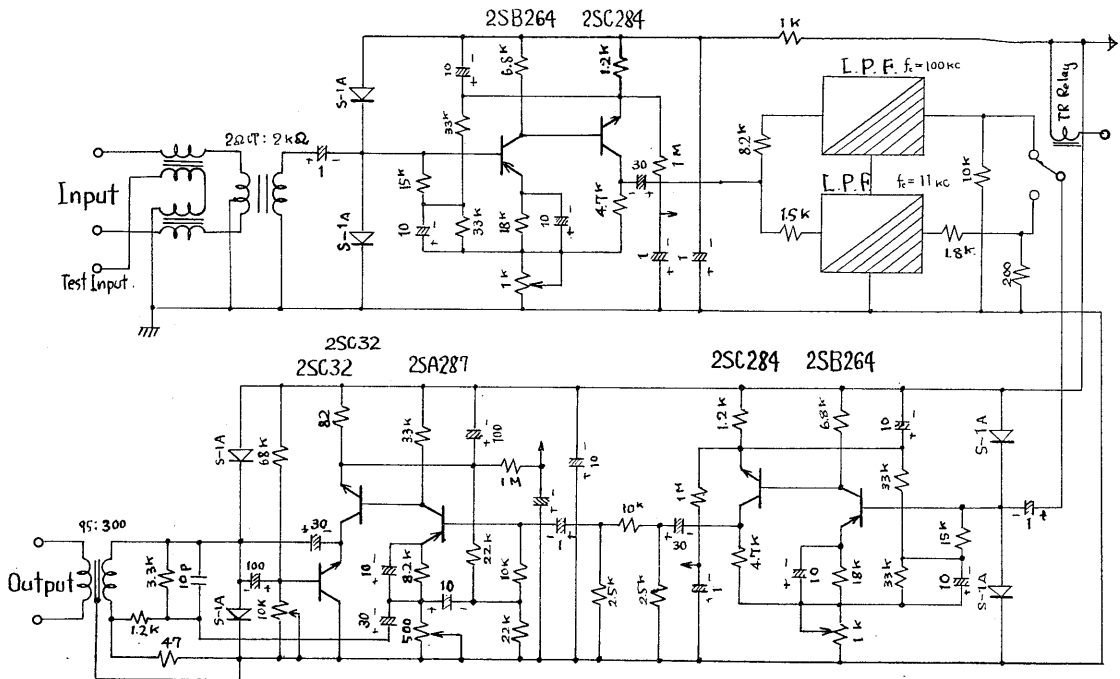
写真(2) 前置増幅器

エレメント 方向	直流抵抗 (Ω)	1kcにお ける実効抵 抗(Ω)	対地容量 C(μ F)	L(mH)	f_0 (kc)	Q
N—S	2	7.3	0.0135	0.44	65.3	24.7
E—W	2	6.3	0.0100	0.45	73.6	33.7

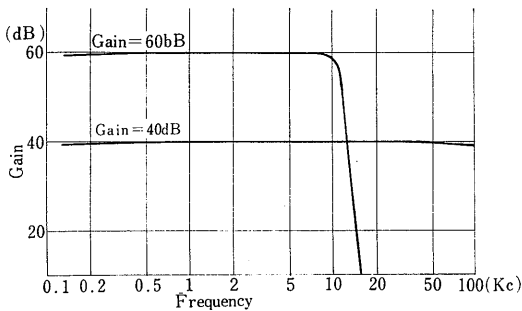
第2表 空中線定数表



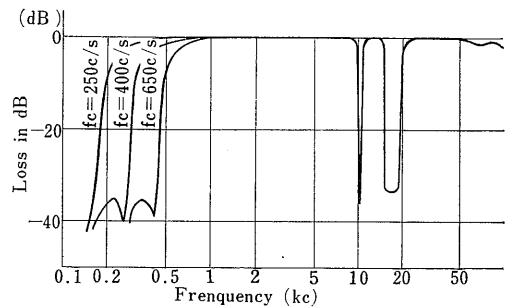
写真(3) Whistler 観測装置



第5図 前置増幅器回路図



第6図 前置増幅器周波数特性



第7図 周波数特性

は十分である。最少入力レベルは -120 dB (注) で Dynamic Range は 60 dB にしてあるので -60 dB の入力まで飽和することなく増巾出来る。

利得 40 dB の場合広帯域としたのは空電スペクトル観測を計画しているためである。

前置増巾器から主増巾器まで約 200 m は 95Ω の平衡2心同軸ケーブル (RG 22A/U) を用い伝送損失の軽減と雑音混入をさせている。尚, 落雷及び過大入力に対する防護策として避雷器とダイオードによる保護回路を用い

(注) トランジスタ 2SB264 の NF は動作点 4 V $I_c=0.5\text{ mA}$, 入力インピーダンス $Z_{in}=2\text{ K}\Omega$ において $NF=8\text{ dB}$ (100 c/s にて) 3 dB (1 kc/s にて) 2.5 dB (10 kc/s ~ 100 kc/s にて) 熱雑音 $N_i=0.6\text{ }\mu\text{ V}$ 帯域 11 kc 温度 25°C にて

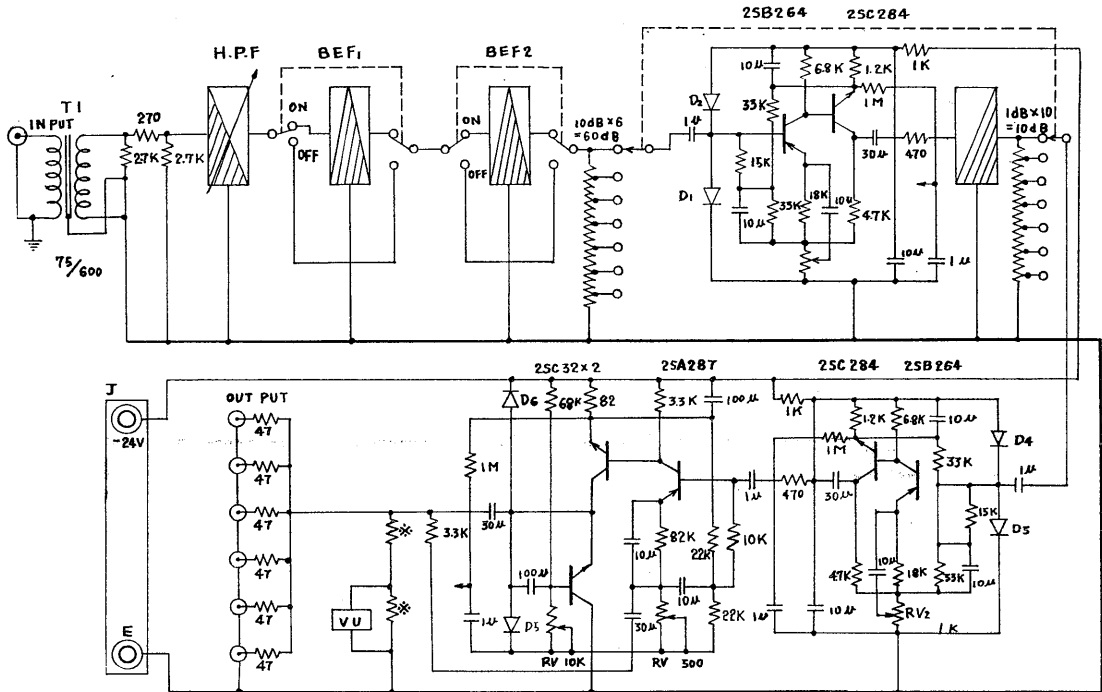
た。第6図に周波数特性を示す。

3.3 主増巾器

主増巾器は前置増巾器よりの信号を 0 dB まで増巾し6個の出力に分配する2チャンネル構成の増巾器である。この増巾部には電源周波数及びその高調波による雑音除去のため低域遮断フィルタ ($f_0: 250\text{ c/s}$, 400 c/s , 650 c/s 切替) と長波通信妨害除去のため 10.3 kc/s と 15 kc/s ~ 20.5 kc/s の帯域消去フィルタを組込んだ。このフィルタの減衰量は第7図に示したように 35 dB あり依佐美局の長波通信妨害を可成り軽減することが出来た。

3.4 時刻信号発生部

ルーチン観測のための制御機構でテープレコーダの起動, 停止信号と毎分・毎秒の時刻信号を送出するもの



第8図 主増幅器回路図

で、高安定化水晶発振回路により得られた 60c/s の電圧を電力増巾し、同期電動機を駆動する。これによりカムとリレーの組合せによって毎秒 440 c/s、10 秒毎 880 c/s の信号を送出することができる。

ルーチン観測のため毎時20分、50分から2分間自動的に受信信号をテープレコーダに録音するので、測定時刻1分前にテープレコーダの電源を投入し、3秒前にモータを駆動し定速回転になってから受信記録を行う。ため込み用テープレコーダは2チャンネル11号リールを用い、1チャンネルに受信録音を、他チャンネルに時刻信号を録音し1秒毎のピップを解析時の観測時刻判読に役立たせる。この装置の回路図を第9図に示す。

4. 観測データの処理

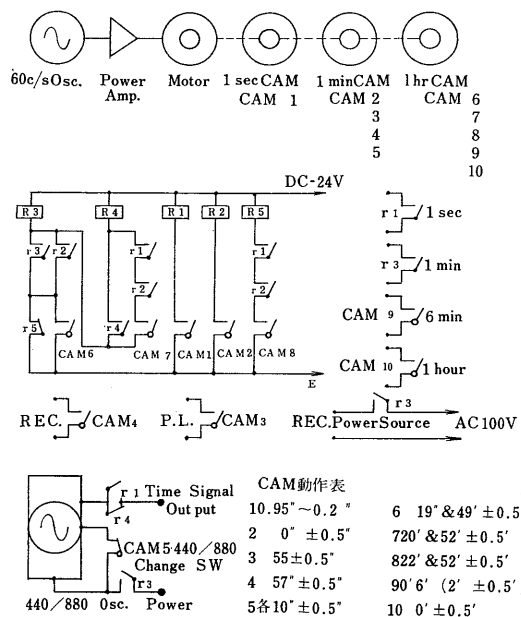
観測により得られた録音テープを別の再生装置にかけ聴覚によって Whistler の有無を確認する。

Whistler の強度は極めて弱く空電や人口雑音に妨げられ、充分注意して聴取しないと判別が困難である。それ故観測者は解析に相当熟達しなければならない。

Whistler の周波数 f (c/s) と伝搬時間 t (s) の間には次の関係が成立つことが知られている¹⁾。

$$t = D \cdot f^{-\frac{1}{2}} \quad (s) \quad (1)$$

式中の D は分散と呼ばれ一つの Whistler については定数であり、次式で示される。



第9図 時刻信号発生部回路図

$$D = \frac{1}{2c} \int_{\text{Path}} \frac{f_0}{\sqrt{f_H}} ds \quad (s^{\frac{1}{2}}) \quad (2)$$

但し f_0 : Plasma frequency で電子密度の平方根に比例する。

f_H : Electronic gyrofrequency で地球磁界の強

さに比例する

c: 真空中の光速。

従って分散 D は媒質中の電子密度, 磁界の強さ及び伝搬路の長さに依存することになるので, Whistler 観測にあたって D を調べるのが超高層大気中の電子密度を知る上の重要な手がかりになる²⁾。

$D(s^2)$ の値は Whistler を音声周波分析器 (Sound Spectro Graph) にて解析し決定する。これから得られた解析曲線は縦軸に周波数 f , 横軸に時間 t のパターンで表わされ, これをソナグラムという。

この場合, 予め $f=(D/t)^2$ 式を用いて D に 5, 10, 15, ……と数値を入れて計算した $t-f$ 曲線群のグラフと最も良く合致する曲線の D の値をもって, その Whistler の D とする¹⁾。従ってその測定精度は D の値の ± 2.5 となる, 更に Broad tone type のもの, 或は強度が弱くソナグラムがはっきりしないものでは精度が悪くなると思われる。

第3表は Whistler の発生頻度の多い2月と3月(1967)に試験的に連続観測を行なったときの結果の1例である。Whistler 受信時刻と分散 D の値をその日に表にまとめ整理の便を計った。

当所で使用している Sound Spectrograph のブロックダイアグラムを第10図に, その性能表を第4表に示した。

第3表 WHISTLER 観測記録

観測年月日 昭和42年3月20日 快晴

中部工業大学 超高層観測所

観測者氏名 太田

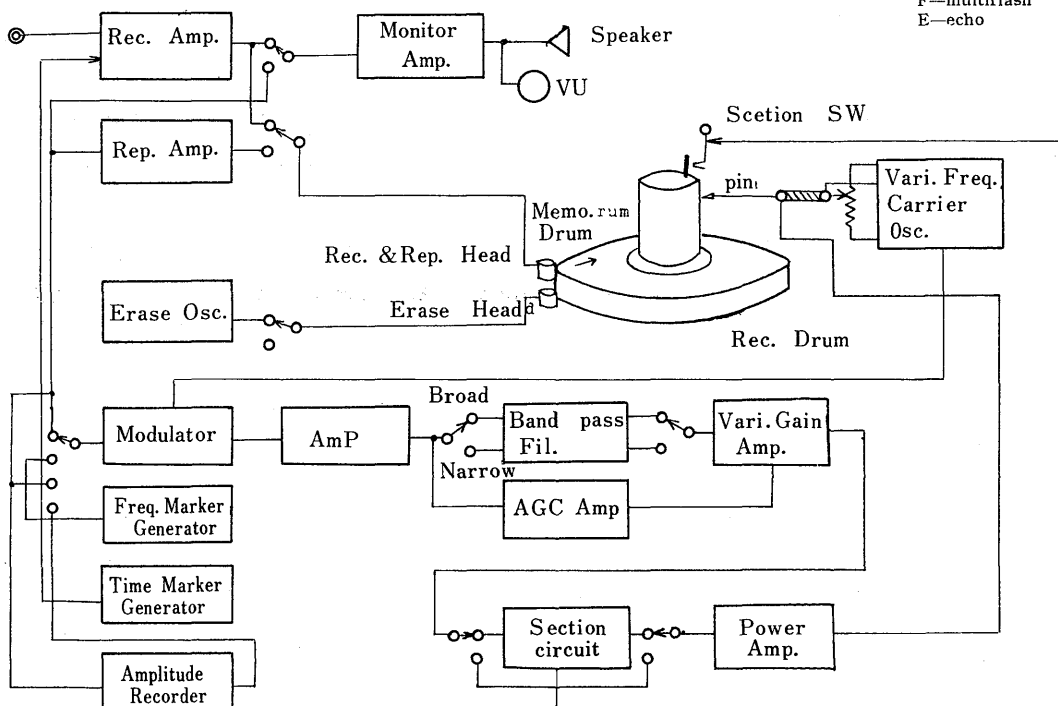
{ 日出 5.58

日入 18.04

WHISTLER の分散 ($sec^{1/2}$) と型名

16	17	18	19	20	21	22	23	24	1	2	3	4	5	6	7
0.0															
0.1															
0.2															
0.3															
0.4															
0.5															
0.6															
0.7															
0.8															
0.9															
1.0															
1.1															
1.2															
1.3															
1.4															
1.5															
1.6															
1.7															
1.8															
1.9															
2.0															
2.1															
2.2															
2.3															
2.4															
2.5															
2.6															
2.7															
2.8															
2.9															
3.0															
3.1															
3.2															
3.3															
3.4															
3.5															
3.6															
3.7															
3.8															
3.9															
4.0															
4.1															
4.2															
4.3															
4.4															
4.5															
4.6															
4.7															
4.8															
4.9															
5.0															
5.1															
5.2															
5.3															
5.4															
5.5															
5.6															
5.7															
5.8															
5.9															
総数	3	1	8												

型の記号 S—short
L—long
H—hybrid
P—multipath
F—multiflash
E—echo



第10図 Sound Spectro graph

Sound Spectro graph の性能

A. 周波数範囲, 分析時間(録音時間), 濾波器実効帯域幅

RANGE	分析周波数表示範囲		分析時間	実効分析濾波器帯域幅	
	Normal	Expand×2		狭	広
①	0~8000c/s	0~4000c/s	2.4sec	45c/s	300c/s
②	0~2500c/s	0~1250c/s	7.2sec	15c/s	100c/s

B. 録音再生特性

RANGE	Flat	85~8000c/s にて偏差±2dB 以内
①	High Boost	1000c/s を 0 dB として 100c/s にて -10dB±4dB 8000c/s にて +10dB±4dB
②	Flat	30~2500c/s にわたり偏差±3dB 以内

C. 記録結果のサイズ

記録紙寸法 306mm×145mm 乾式放電記録紙

記録結果の寸法 295mm×104mm

D. Time SECTION 及び振幅描記可能

E. 時間目盛描記

電源周波数を基とする 1/60 秒の目盛が得られる

F. 周波数目盛

記録紙の横方向に 1 KC おきの周波数目盛線が得られる

第4表 Sound Spectro graph の特性

5. 観測結果の検討

1967年2月9日より26日まで18日間、当所で試験的観測を行って得た結果について述べる。但し(J.S.T.)7時から14時まででは次の理由により観測を行はなかった。

(1) 日中は夜間に比べ人工雑音が強くなり S/N 比が悪く観測が困難であった。

(2) Whistler の伝搬は電離層を通過し受信点に到達するが、その際特に D 層内で吸収され減衰して到来強度が極めて弱く前項の理由と共に観測が困難である。

観測期間中の日別、時間別 Whistler 発生回数の記録を第5表に示し、日変化のグラフを第11図に示す。

whistler 発生頻度 (1967年2月9日~2月26日)

J.S.T. 月日	15	16	17	18	19	20	21	22	23	0	1	2	3	4	5	6	計
2. 9						1							2	7			10
10												1	1				2
11					4							1	4				9
12													3	5	1		9
13	1						1										2
14												1	1	9	3		14
15																	0
16														4	4	2	10
17				2	1	2						8	13	6	4	3	39
18					1							2	19	26	55	54	187
19														3			3
20												9		12			21
21				2										1	4		7
22				6	38	7											51
23		3	1									1	2	1			8
24												3	1	1			5
25	2	29	11	14	2												58
26										2	2	5	5	12	4	1	31
計	2	32	20	54	15	3	1	0	0	2	4	47	52	118	78	37	

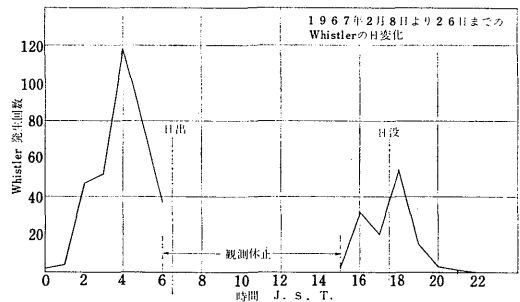
第5表 Whistler 観測記録 (1967 2. 9 ~ 2. 26)

第11図からわかるように Whistler の発生の極大が日出前2時間30分の4.00J.S.T.と、日没後30分の18.00J.S.T.の2ヶ所にみられる。これは前報告³⁾の北海道母子里観測所のI.Q.S.Y.におけるWhistlerの日変化と同じ傾向があり、現在の太陽活動が静穏であることを意味している。

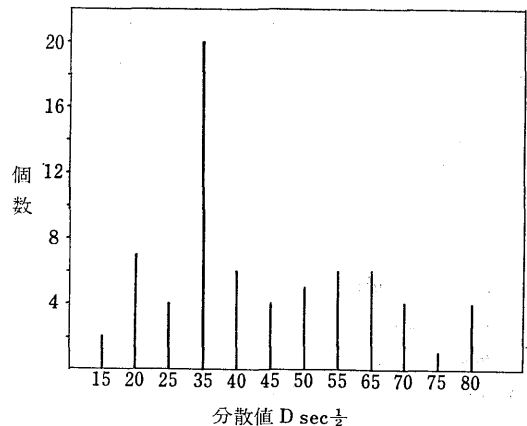
分散については観測期間中に記録できたWhistlerの全資料のうちSound Spectrographで解析しDの判読が可能であったものは僅か69ヶにすぎず、従ってこれだけのデータで分散に関する全体的な考察を行うことはできないので、分散値の分布とソナグラムの数例を示すにとどめ今後の観測により考察を行う予定である。

分散値の分布は第12図に示されたように、D=35のShort Whistlerが最も多く受信できた。そしてこれらは全てPure Tone Typeのもので、J.S.T.16.00~18.00の間に観測された。(ソナグラムNo.1参照)

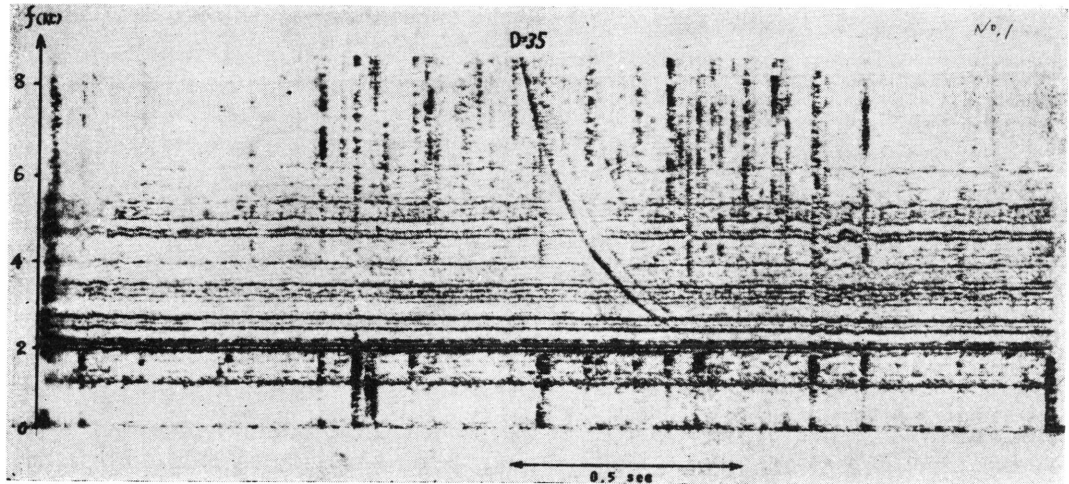
ソナグラムNo.2はWhistler Echoの1例で稀にしか観測されない。Echoは南半球(オーストラリア附近)で起った雷放電によるWhistlerがShort Whistlerと



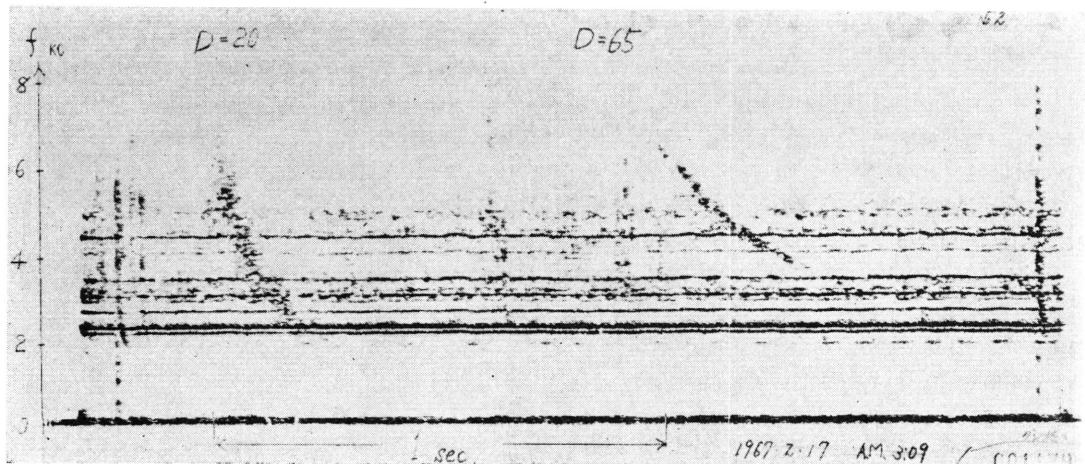
第11図 Whistler の日変化



第12図 Whistler 分散値の分布



ソナグラム No. 1

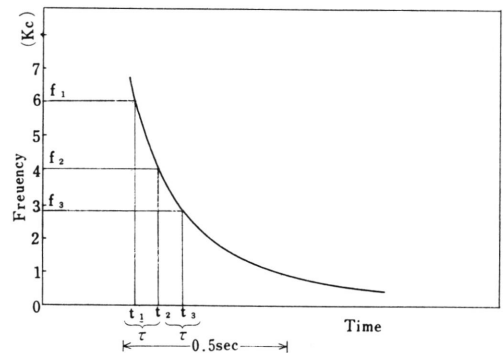


ソナグラム No. 2

して北半球（日本）に到来し、これが反射して同じ地球磁力線に沿って両半球間を何回も往復し、1往復毎に1つの Whistler として次々に観測される場合であって、一連の分散 D の値は1:3:5……の関係にある。この例においても最初の Whistler の D は20で次のは65となり、ほぼ1:3の関係になっており明かに Echo である。

6. Whistler 自動計測装置の試作

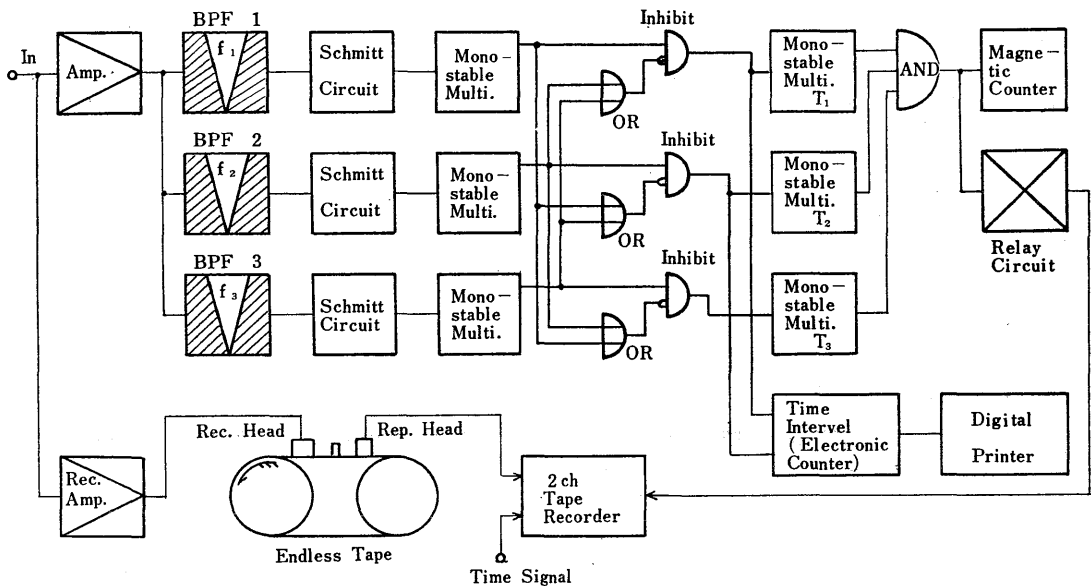
前述の如く当地域においては Whistler の発生頻度が少く、連続観測が望まれるが、テープの保有量・人員・整理能力からいって殆んで不可能である。そこで Whistler の発生頻度及び分散値を自動的に記録する装置の試作を行っているので、その構成と Whistler の検出方式について次に述べる。



第13図

6.1 検出方式

Whistler は Gliding tone で周波数の時間的变化を表わす式は(1)式であり、その関係を図にプロットすると第



第14図 Whistler 自動観測装置 ブロックダイアグラム

13図のようになり、又低緯度地方の Whistler は Pure tone に近い。この関係を利用し観測装置主増巾器出力を狭帯域の Band pass フィルタで予め定めた3つの周波数に分解し、その出力を Schmitt 回路でパルス化する。

このパルスを遅延回路と論理回路を通して3つのパルスが順次に或る時間差をもって生じたときのみ計数し、同時に録音テープレコーダを起動する。この間現象発生からテープレコーダ起動までの時間、現象は一時的にエンドレステープレコーダに記憶しておく。又これと同時に2つのパルスの発生時間差を計測しデジタルプリンタにて印字する。後述の関係式により直ちに分散値 D を求めることが出来る。

低緯度地方での Whistler の周波数は 10 kc/s 以下であり 4 kc/s 附近の強度が最も強いので検出する周波数として 4 kc/s を中心に 3 周波数 f_1, f_2, f_3 を選定した。夫々の到来時刻を t_1, t_2, t_3 とすれば(1)式より

$$t_1 = Df_1^{-\frac{1}{2}} \quad t_2 = Df_2^{-\frac{1}{2}} \quad t_3 = Df_3^{-\frac{1}{2}}$$

従って到来時間差は

$$t_2 - t_1 = D(1/\sqrt{f_2} - 1/\sqrt{f_1}) \dots \dots \dots (3)$$

$$t_3 - t_2 = D(1/\sqrt{f_3} - 1/\sqrt{f_2})$$

この時間差を D に無関係に等しくするためには

$$2/\sqrt{f_2} = 1/\sqrt{f_1} + 1/\sqrt{f_3} \dots \dots \dots (4)$$

であればよいのでこの関係を満足するように f_1, f_2, f_3 をそれぞれ $f_1 = 6 \text{ kc/s}$ $f_2 = 4 \text{ kc/s}$ $f_3 = 2.85 \text{ kc/s}$ とした。

又 $t_2 - t_1 = \tau$ とすれば(3)式より

$$D = [\sqrt{f_1 f_2} / (\sqrt{f_1} - \sqrt{f_2})] \tau$$

となるので $f_1 = 6 \text{ kc/s}$, $f_2 = 4 \text{ kc/s}$ を代入すると

$$D = 345 \tau \quad (\text{s}^{\frac{1}{2}}) \dots \dots \dots (5)$$

となるので τ を測定すれば簡単な関係式で分散 D が求まることとなる。

通常観測される Whistler の分散 D の値は Short Whistler で 30~70, Long Whistler で 80~110 であるので遅延回路の Monostable Multivibrator の時定数 T_1, T_2, T_3 は次の如く定めた。

検出する Whistler の D は前述のように 30~110 であるので(5)式より時間差 τ は 87.0[ms]~320[ms] の範囲となる。従って f_1 から f_3 に至る時間は最大 640[ms] となるので

$$T_1 = 640[\text{ms}] \quad T_2 = 320[\text{ms}]$$

とし、 T_3 は最後の AND 回路の動作時間を決定するので

$$T_3 = 100[\text{ms}]$$

とした。

次に分波濾波器の Whistler 周波数成分の通過時間を求めれば(1)式より

$$dt/df = -\frac{1}{2} D f^{-\frac{3}{2}}$$

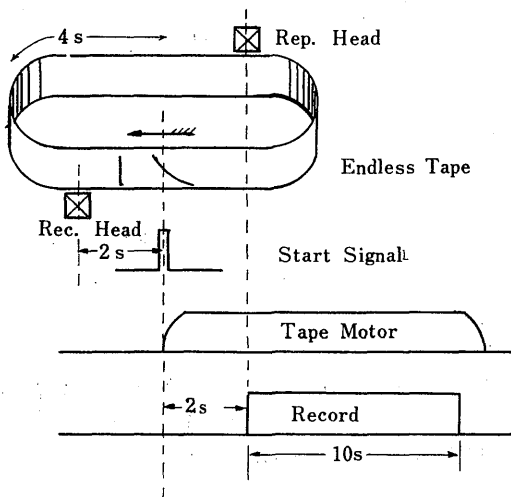
であるから 4 kc/s において

$$|dt/df|_{4 \text{ kc/s}} = 1.98 \times D \times 10^{-6} [\text{s/c/s}]$$

即ち、 $D = 30 \sim 70$ 及び $80 \sim 110$ に対して夫々 60~140 [$\mu\text{s/c/s}$] 及び 160~220 [$\mu\text{s/c/s}$] となる。従ってパルス発生時間差に比しパルス巾を小さくするため濾波器の通過帯域を 50c/s とした、従って発生パルス巾は 3~11ms となる。

6.2 構成

本装置の構成は前述の検出方式に基づいて第14図に示したようにした。動作の詳細は省略するが AND 回路の出力パルスをカウンタで計数し、同時に現象ため込み用テープレコーダの起動信号とする。然し現象はこのパルスの発生前に起きているので、現象の一時的記憶装置として周期15秒のエンドレステープレコーダを用い、又 Whistler の原因となった先行クリックをも録音するため、録音ヘッドから再生ヘッドまでの遅延時間を4秒とした。ため込み用テープレコーダの動作時間は1回12秒としたが、12秒以内に続いて Whistler が到来した場合には更に12秒間動作を延長するようにしてある。



第15図 動作順序図

6.3 今後の問題点

試作の段階において個々の部分について実験を行い動作の確認を得たが次の点に欠点が見出され今後研究を進める予定である。

即ち(1) Whistler が続いて0.65秒以内に到来した場合には録音は行なえるが度数のカウンタが出来ない。

(2) 度数のカウンタのみでなく、その時間的分布を記録する方式の研究。

(3) S/N 比が低い場合にも更に確実に検出する方法及び空電雑音、人工雑音のレベルが時間的に変化しても誤動作なく検出する方式の研究。

7. 結び

本学超高層研究所の一部門である Whistler 研究のための観測装置について述べたが、何分にも観測開始からの日が浅く、ルーチン観測の結果が未だ出ていないので資料が十分なく考察が不完全になったことは遺憾である。

今迄に得られた結論と今後に残された問題は次の如きものである。

(1) 外来雑音については立地条件から避けられないので、観測装置に改良を加え雑音対策を施す必要がある。即ち前置増巾器には低域遮断フィルタを入れなかったもので、電源周波数及びその高調波が強く前段で飽和を起した。そこで利得を20dB落して使用している。故に前段に低域遮断フィルタを入れ、且つ Dynamic range の更に広い回路に改良すること。また電源周波の逆相電圧を加え雑音を相殺する方法も考えられるので研究を行うこと。

(2) 当所においては夏期の Whistler 観測は不可能であった。即ち1967年7月10日から20日間 J. S. T. 16.00 ~ 20.00 の間試験的に連続観測を行ったが、雷放電のため冬期に比し Background Noise が著しく遂に Whistler は受信出来なかった。然し Tweek は19.00時頃をピークとして頻繁に受信出来た。

(3) Whistler の分散は Sound Spectrograph の解析曲線から求めているが、解析時間が一現象につき準備時間を含めて約5分かかり、また放電記録紙を使用しているので分析数が多くなると、時間と経費の面で困難を生ずる。

そこでブラウン管による Whistler 解析器の必要性から試作の準備を進めている。この原理は既に述べられている⁴⁾が改良の上メモリスコープを用いる予定である。

(4) Whistler 自動計測装置は前項に述べた如く各部分について試作・実験を行い、現在総合組立中であるが近く自動計測を行なう予定である。その結果及びデータについては第2報以下に報告する予定である。

8. 謝 辞

日頃から常に御指導いただいた本学金原淳教授に深く感謝します。

雑音測定に際しては名古屋大学空電研究所、岩井章教授の御厚意によるものであり、その他色々御指導御検討を賜った空電研究所の方々に厚く御礼を申し上げます。図面の作成に協力していただいた本学電子工学科、三ツ口、渡辺両君に感謝する。尚観測データは昭和42年3月卒業生安井新二他3君の卒業研究によるもので併せて謝意を表します。

9. 文 献

- 1) R. A. Helliwell: Whistler and Related Ionospheric Phenomena. 1965. Stanford University press.
- 2) 金原淳他: 中部工業大学紀要 第2号 1966
- 3) 岩井章, 大津仁助: 空電研究所報告 第8巻 1958.
- 4) 同 上 : 空電研究所報告 第7巻 1957