

菅平宇宙電波観測所における  
ホイッスラー空電観測(2)\*

—冬季三カ月間 (1970. 1~1970. 3) の観測結果—

梶 靖 夫\*\* 奥 沢 隆 志\*\*  
芳 野 赴 夫\*\* 上 滝 実\*\*\*Observation of Whistling Atmospherics at  
Sugadaira Space Radio Observatory—The observational results obtained during the  
period from Jan. 1 to Mar. 31, 1970—

Yasuo KAJI, Takashi OKUZAWA, Takeo YOSHINO and Minoru KÔTAKI

## Synopsis

*This is a report on the whistling atmospherics observed at Sugadaira Space Radio Wave Observatory during the period from Jan. 1 to Mar. 31, 1970. The local-time variation of occurrence frequency and of dispersion are discussed which are not inconsistent with the results of earlier investigators. Most frequent value of the dispersion at Sugadaira is found  $35.0 \text{ (sec)}^{1/2}$ . Distances between the generating sources and the observatory are calculated for some examples of the whistler which are preceded by the tweek impulse; it is found that the distances are remote from the magnetically conjugate point. The last result may provide an experimental evidence of the propagation of the whistler signals underneath the ionosphere before reaching the transmitting conjugate point.*

## 1. 緒 言

VLF 自然電波ホイッスラーは、地上において地球磁気圏周辺のプラズマを探索する一つの手段として高緯度地方を中心に多くの観測所が設けられ、過去、国際地球観測年 (IGY) を一つのエポックとして、その緯度別発生分布、伝ばん路、発振機構などについて詳細な研究が進められている。菅平においても本年からはじまった冬季の連続観測のなかでこの魅惑的な音色を持つホイッスラーが頻繁に受信されたのである。

菅平宇宙電波観測所は、地理的経緯度  $N36^{\circ}31'$ ,  $E 138^{\circ}19'$ , 地磁気緯度  $N26^{\circ}0'$  に在り、ホイッスラーの低緯度地域の観測網を埋めるうえで重要な位置に置かれていて、昭和 44 年 2 月より予備観測を始め、45 年 1 月からルーチン観測の態勢に入った。ルーチン態勢に入ってから四カ月余り経過した段階であるが、本年度冬季三カ月間におけるホイッスラーの発生数、分散、および源までの距離等が得られたので報告する。

\* 昭和45年5月9日受理

\*\* 応用電子工学科

\*\*\* 電波工学専攻大学院生

## 2. 観測方法

VLF 受信用デルタ型ループアンテナにより受信されるホイッスラー波の周波数帯域は 10kHz 以下の可聴周波帯であるので、受信装置としては比較的簡単な低周波増幅器で充分である。受信装置の系統図は先の報告<sup>1)</sup>に詳しく述べられているのでここでは割愛するが、ホイッスラー空電の電界強度は 100  $\mu\text{V}/\text{m}$  以下の微弱な信号であるので充分な利得と S/N 比が必要であり、電源からのハム、周囲の人工雑音を除くためのフィルターを挿入し不要な電波の混入をできるだけ防いでいる。受信信号の解析にはソナグラムを用いる。

観測時間は URSI 第 13 回総会で毎時 20~22 分および 50~52 分の各 2 分間に決められているが、10 インチ磁気テープの交換を 1 日 1 回とするためにそれぞれ 1 分 20 秒間録音し、それを解析することにした。観測者は録音された磁気テープからの再生音を耳で聞いてその選別を行い、五段階に分類して発生頻度を求めた。この「五段階法」は 1 分 20 秒間に受信されるホイッスラーの数を 0, 1~2 個, 3~5 個, 6~8 個, 9 個以上の五段階に分け、それぞれ index を 1~5 に指定してデータを統計的に処理する方法を言う。

ホイッスラーの周波数  $f$  と伝ばん時間  $t$  の間には

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

という関係式が成り立つ<sup>2)</sup>。式中の  $D$  は分散と呼ばれ、受信されたホイッスラーについて夫々決まる定数である。ソナグラムにより解析されたホイッスラーは (1) 式にしたがった  $t$ - $f$  曲線としてソナグラムに描

かれる。分散値の測定は、(1) 式で分散  $D$  をパラメーターとして、あらかじめ 2.5(sec)<sup>1/2</sup> 毎に曲線群を透明板上に描き、これを記録紙上の受信曲線と合わせ最も良く合う曲線をもってそのホイッスラーの分散  $D$  とする、いわゆる適合法で行なった。実際の受信データは pure tone が多いので誤差は  $\pm 1(\text{sec})^{1/2}$  であるが分散が spread するタイプや、ソナグラム上で曲線が一部しか現われない場合の誤差は若干増加する。

## 3. 観測結果

### 3.1 発生状況

第 1 図に冬季三カ月のホイッスラーの発生数を地方時 (JST) をパラメーターとして示す。この発生数は、五段階法にしたがって指定された各 index における平均の発生個数に一月間の発生回数をかけて得られる平均値である。図中の縦軸は、以上の方法で得られたホイッスラーの発生数の一月間の総和を表す。この図から明らかのように、発生数は 1 月が最も多く、2 月から 3 月になるにしたがい減少する。豊川 (地磁気緯度 24.1°) などの低緯度地域の過去の受信記録<sup>3)</sup>によると、冬から夏にかけて発生数が減少していく季節変化を示しているが、菅平でもこれと同様な傾向を示す。これは、ホイッスラーの源となる雷放電の発生頻度が南半球では夏に高くなるため、北半球では冬にホイッスラーが多く受信される事情による。また日本では冬期の雑音レベルが低いことなどによるものと考えられる。時間別では 3~5 時と 16~18 時の時間帯にピークがあるが、3 月を除いて日没後の数時間の発生

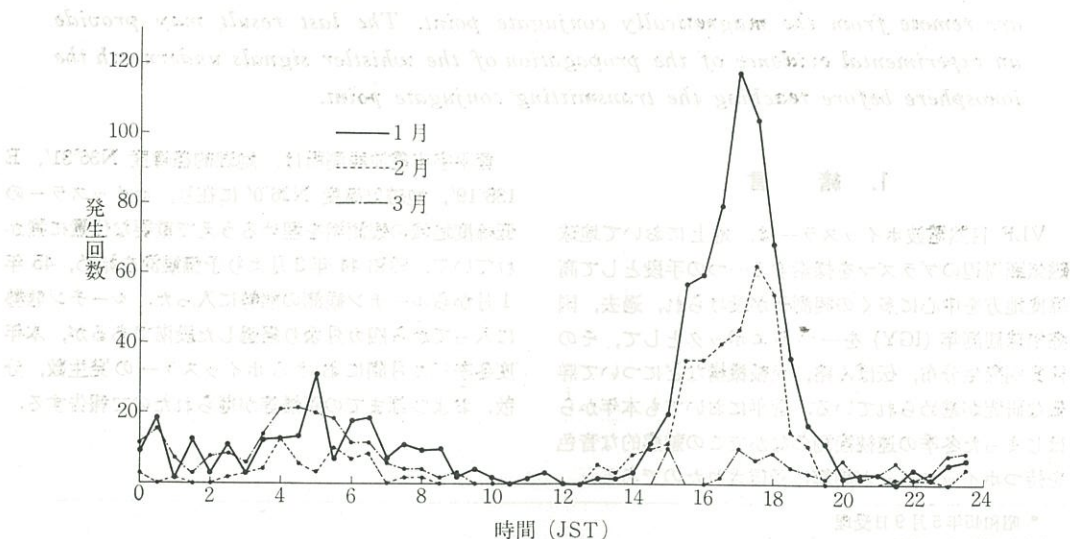


図 1 ホイッスラーの月別発生数

数の方が前者にくらべてはるかに多くなっている。これらの発生数の日変化は、電離層による吸収、減衰の効果に対応して変化すると考えられる。

3.2 種別

菅平で受信されるホイッスラーは、その源を南半球

にもつショートホイッスラーが全体の89%をしめる。ホイッスラーはそのソナグラムの特성에応じていろいろな名前が付けられており<sup>4)</sup>、発生源とその磁気共軌点の間を何回も反射するタイプを echo-train type といい、第2図にその例を示す。one hop, three hop

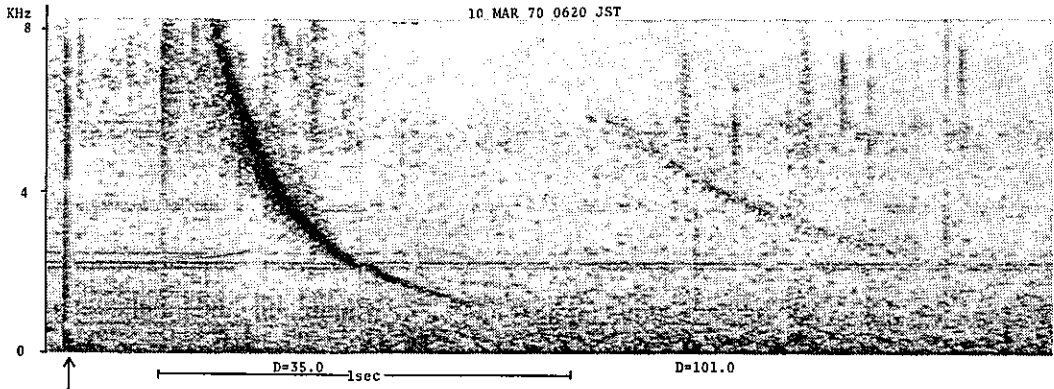


図2 echo-train type ホイッスラー

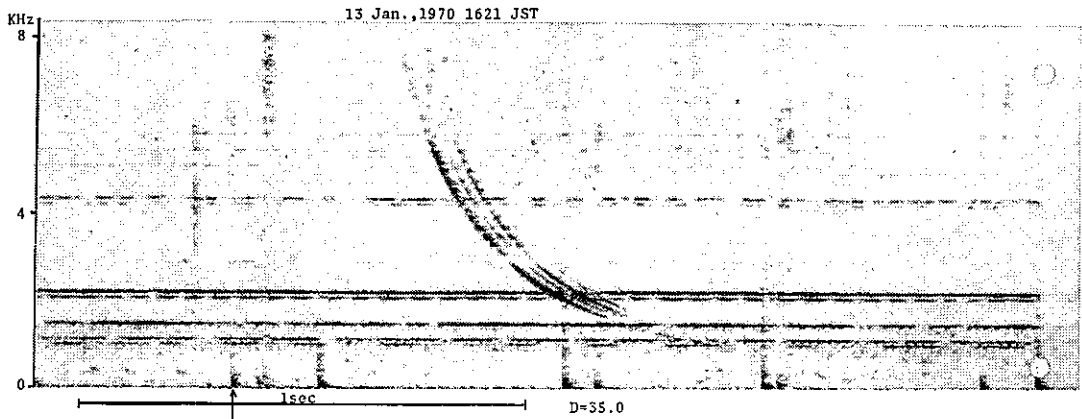


図3 multi-path type ホイッスラー

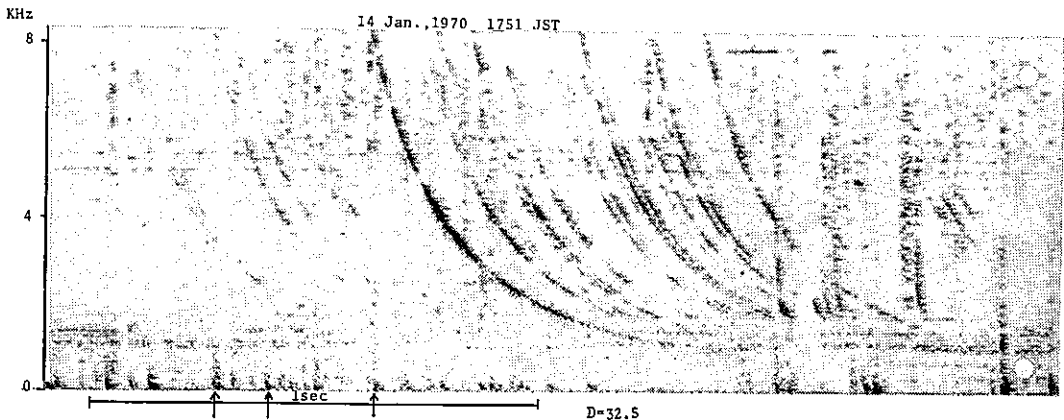


図4 multi-flash type ホイッスラー

WHISTLER DISPERSION

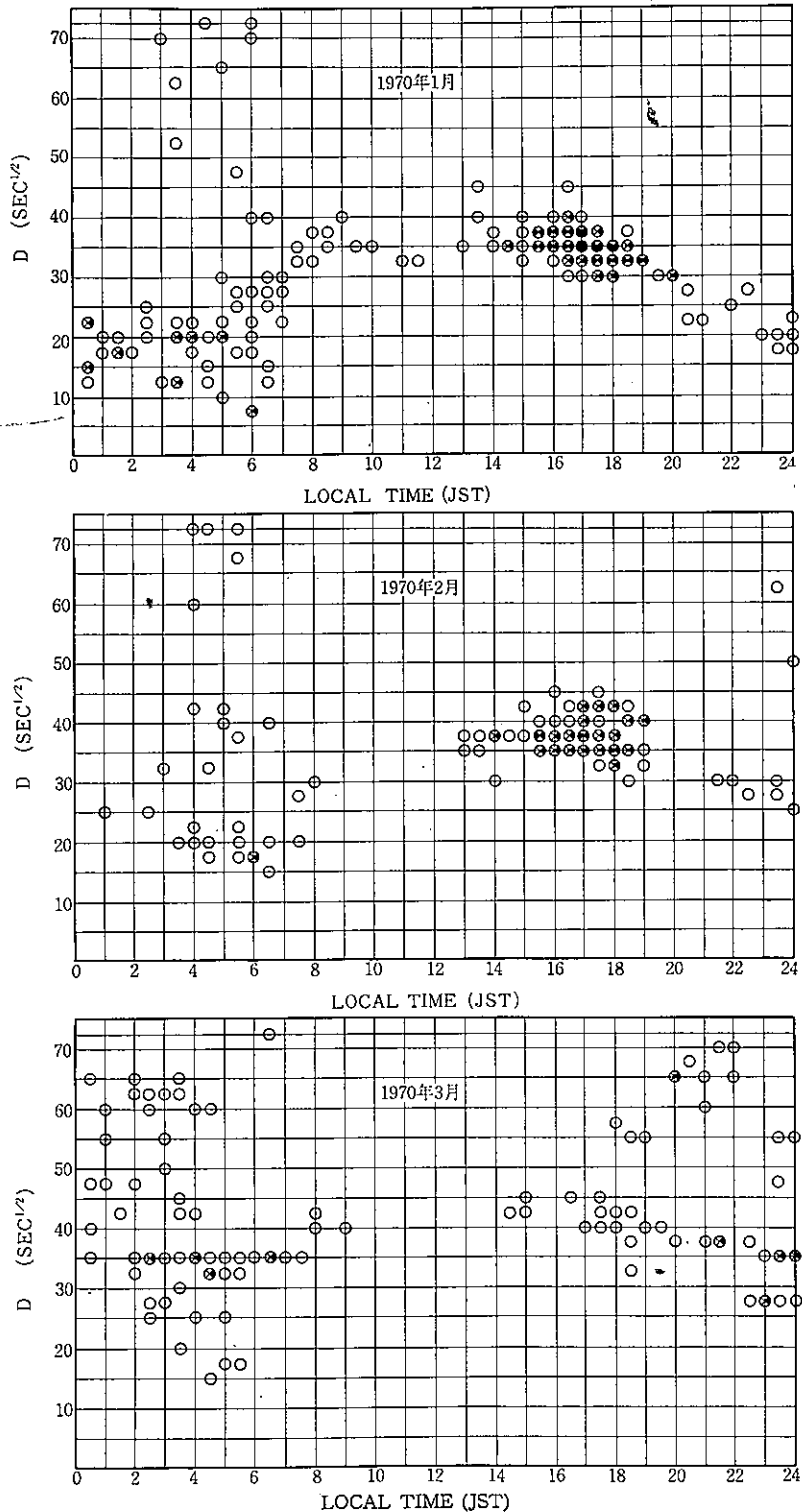


図5 ショートホイッスラーの分散値の月別分布

の成分ホイッスラーが明瞭に分離していることが分かる。同一の発生源から互いに異なる path を通って伝はんすることにより2個以上の成分が生じるときがある。これを multi-path type といい、第3図にその例を示す。それぞれ異なる源からほぼ同時刻に発生し、train 状になって現われるものを multi-flash type (多重雷型) といい、第4図に示す(それぞれの図中のⓐ印は先行放電を表わす)。

### 3.3 分散 (Dispersion)

第5図に各月別の local time に対する分散値の分布を示す。図中の記号は、ホイッスラーの発生頻度を表わすために、それぞれの月における発生回数の分散値ごとの総和を示している。この図から分かることは、1) 日の出まへのピークでは  $D$  は 20~30、日没後のピークでは 30~45 に変るかなりはっきりした分散の規則的日変化を示すことである。2) 22~05 時にかけては  $D$  が 10~70 以上まで分布し非常に幅広く広がっている。3) 菅平での冬季における分散値の平均は大体 35 である。これらの日変化は太陽の高度に依存する電離層の電子密度の日変化にほぼ対応していると思われる。4) 日の出まへの分散値の平均は1月の20から3月の35へと増加している。第6図に1970年1月2日における分散の日変化の例を示す。これらの原

因は上部電離層の電子密度の変化によるものと考えられているが、 $F_2$  層の臨界周波数  $f_oF_2$  と分散を調べた結果、ほぼ直線関係になり伝はん通路沿いの平均の電子密度と  $F_2$  層の最大電子密度とが比例することが知られている<sup>5)</sup>。しかし、午前のピークのうちでは同時刻に分散値が 10 以下から 70 以上(これは必ず分散に広がりを持つ swish-type である)まで変化する場合があります。後者はおおむねロングホイッスラーに属するので往復運動による見掛け上のダクト幅の広がりを示すが、ショートホイッスラーと見られる場合については後述するように伝はん通路に周囲より密度の高い電子雲が duct を形成し、その拡散との関連で考えられるかもしれない。

### 3.4 異常分散

前述のように日の出前に限って、磁場も  $f_oF_2$  の変動も平常であるにもかかわらず極めて小さな分散値 ( $D=10$  前後) から極めて大きな分散値 ( $D=70$  以上) を持つものまで幅広く観測されることがある。これ等がどのように解釈されるべきかは依然として明確でないが、日の出前時における上部電離層内の電子密度の不均一性から電子雲の存在、その磁力線沿いの拡散など複雑な過程を通して伝はんしてることが考えられる。第7図に示す一連のソナグラフから、分散値

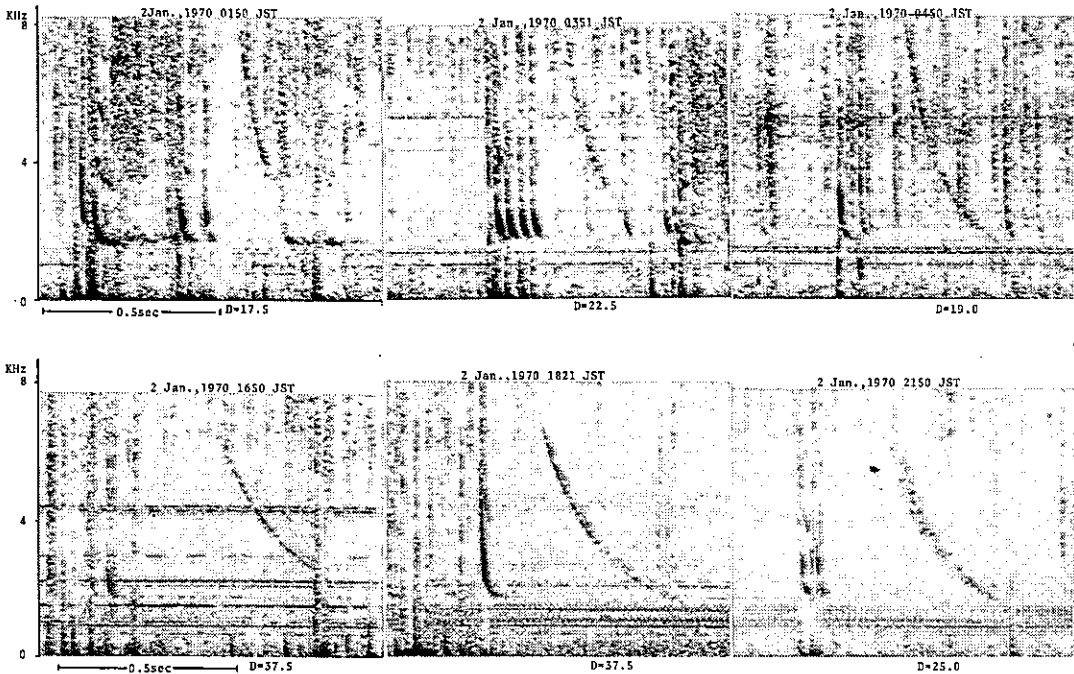


図 6 分散値の日変化の例 (1970年1月2日)

が1時間程度のタイムスケールで変動をしているのが分かる。この変動もダクト形成消滅の目安となるであろう。磁気嵐の際のこの種の報告<sup>6)</sup>はあるが第7図は平常時であるので磁気嵐主相部の時とは別の物理過程があることを示唆している (sunrise effect)。

第8図に  $D=13$  という異常に小さい分散をもったホイッスラー (extremely small dispersion whistler = ESDW) の例を示す。この ESDW の解釈としては、その源が磁気赤道付近にあるとし、導波管モードとホイッスラーモードの結合で伝ぱんするものとされているが<sup>7)8)</sup>、ここにあげた例は tweek の cut-off の下まで ESDW の cut-off は下がっているのだからこれは別の伝ぱん路をとったものであろう。また、この ESDW の形がストレーの理論にかなり合っていること ( $t = \frac{D}{\sqrt{f}}$  に従う) から磁力線沿いにダクト伝ぱんしたと考えたい。

そこで、ESDW の発生の原因について第10図に示すように、電離層内の層状に分布した電子雲の存在によって伝ぱん路が曲げられたと考えることによりあ

るいは説明がつくかもしれない。

第9図に異常に大きな分散値をもつホイッスラーの例を示す。これは先行放電が不明瞭なのでショートホイッスラーであろう。分散値は  $D=70$  であるので管平の平常な値よりはるか大きく、これも ESDW と同様に第11図に示すような伝ぱん路を考えることにより説明がつくかもしれない。

#### 4. 源までの距離

ショートホイッスラーに先だつて到達する tweek 型の先行空電は、雷放電と同時に電離層と地球表面の間を導波管伝ぱんしてくるもので、この tweek の伝ぱん特性より tweek の源、すなわちショートホイッスラーの源までの距離を求めることができる。いま周波数を  $f$ 、空電発生時からの時間を  $t$  とすれば、tweek の伝ぱん式は基本モードについて

$$t = \frac{d}{c} \cdot \left\{ 1 - \left( \frac{c}{2hf} \right)^2 \right\}^{-1/2} \quad (2)$$

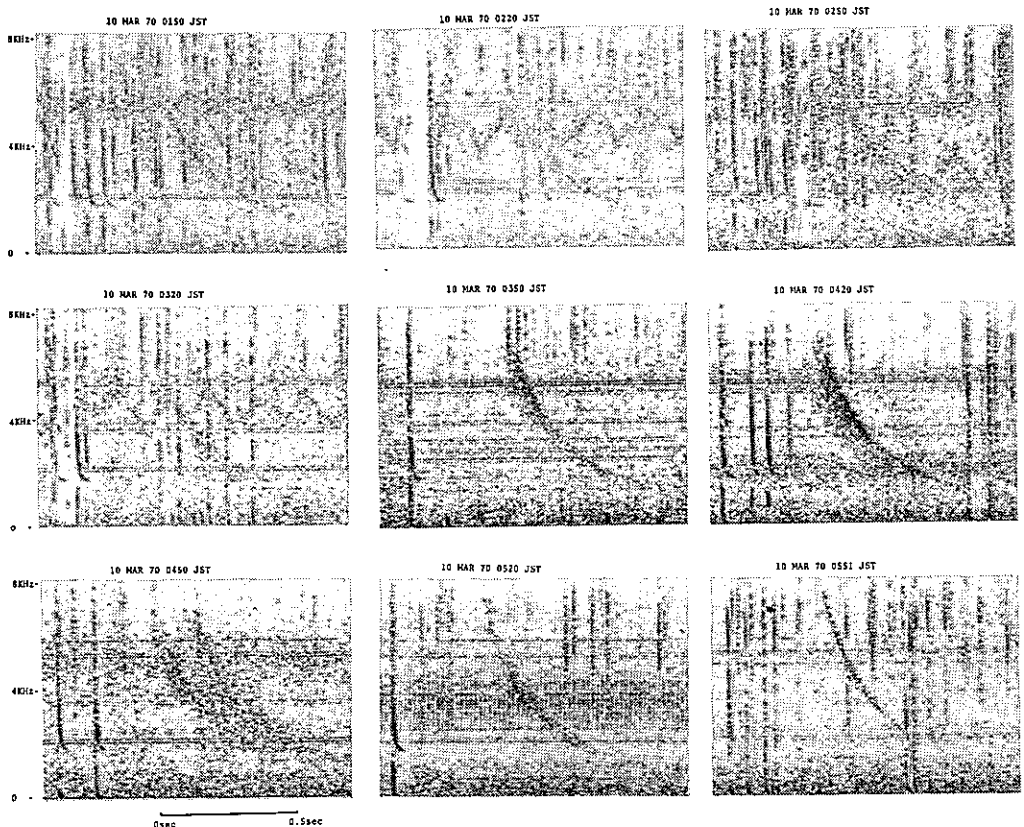


図7 ホイッスラーの sunrise effect を示す例



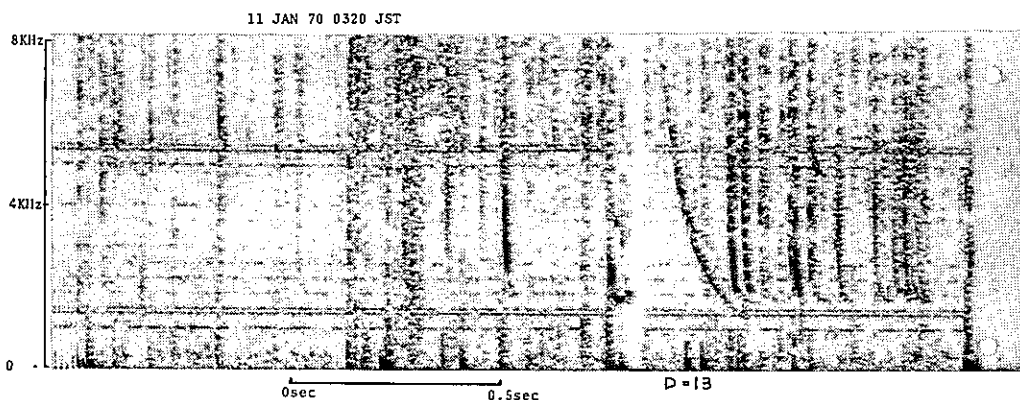


図 8 異常に小さい分散を示す例

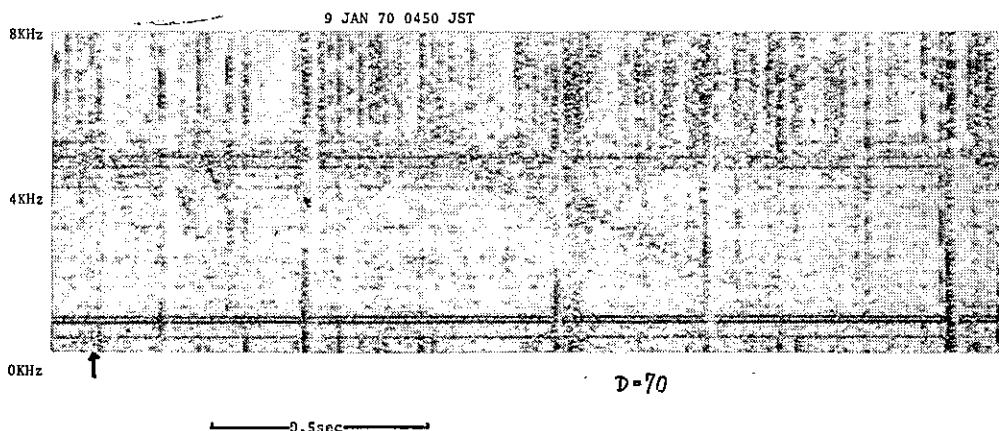


図 9 異常に大きな分散を示す例

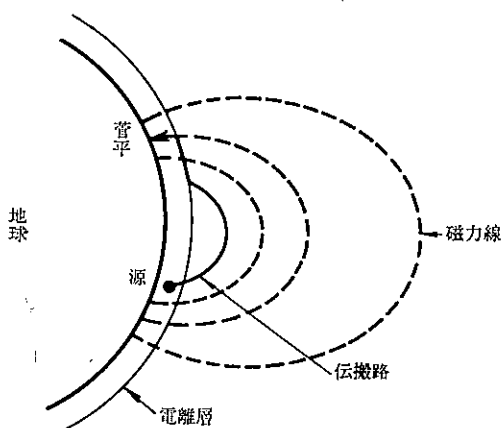


図 10

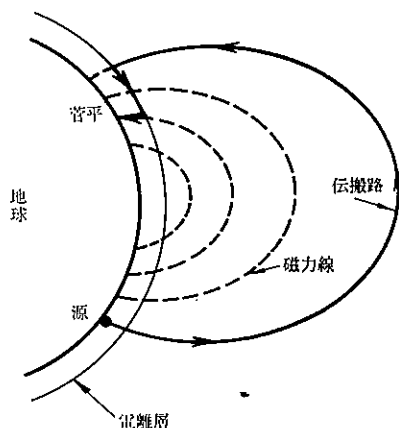


図 11

で与えられる (付録参照). ここで,  $c$  は光速,  $h$  は電離層の見掛けの高さ,  $d$  は源までの距離である. tweek の cut-off frequency  $f_c$  は群速度がゼロになる周波数, すなわち  $f_c = c/2h$  であるから, ソナグラム上より  $f_c$  を求めることにより,  $h$  を決めることがで

きる. つぎにソナグラムより  $(f-t)$  の関係を求め, (2)式を用いて  $d$  が求まる. tweek はおよそ 0.08 秒ぐらいの現象であり, ソナグラム上で読みとる場合に  $\pm 0.008$  秒の誤差を生ずる. したがって求められた距離については最大約  $\pm 15\%$  ぐらいの誤差を考えなければ

第1表 源までの距離

$d$ (km)	$D$ (分散)
$6.45 \times 10^3$	23.0
8.75 "	24.0
6.88 "	27.5
10.30 "	27.5
10.60 "	28.0
11.30 "	28.0
9.49 "	33.0
9.65 "	47.5
8.01 "	48.0
12.80 "	55.0

ばならない。tweekを伴う典型的なショートホイッスラー10例ほどについて計算した結果を第1表に示す。

菅平の磁気共軌点までの距離はおよそ5,800kmであるから、これらの結果はそれよりも遠いところに源があることを示す。ホイッスラーの源が必ずしも観測点の磁気共軌点ではなく、地磁気赤道に対して非対称な位置にあることはこれまでしばしば言われており、例えば荒木<sup>9)</sup>はcut-offを有する小さい分散のホイッスラーについて、発生源が磁気赤道付近であるとし、導波管モードとホイッスラーモードとが結合したhybridモードで伝ばんするとしている。菅平での今回の結果は、測定上の誤差を考えるにしても、いずれも共軌点より以遠の結果になっているので両モードが結合した伝ばんを示唆する実験例の一つである。

## 5. 結 言

以上冬季三カ月間のホイッスラーの観測結果について述べたが、菅平の特徴的な点をあげると次のようになる。

1) 冬季にはショートホイッスラーが大部分でそのほとんどが先行空電を伴っている。

2) 三カ月のうちでは1月に発生数が最も多く、時間別発生頻度では、日の出前2時間と日没後2時間位の時間帯にピークがあり発生が集中している。

3) 分散値には日変化があり、日の出前の20から日没までは40ぐらまで増加し、真夜中になるにしたがいその値は減少する。しかし明け方には70ぐらいのswish typeのホイッスラーがしばしば受信される。

4) 明け方のとる分散値は時定数がおよそ1時間で変動しており、duct形成理論の組立てにとり、一つの目安となる。

5) tweekより求められたショートホイッスラーの源は、一般に磁気共軌点より遠い位置になり、導波管モ

ードとの結合伝ばんを示唆している。その伝ばん特性についてはさらに考察すべき点が少ない。

中間発表として冬季三カ月間の観測結果を報告したが、今後ルーチン観測を続けるなかで菅平での特性の全貌が明らかになるであろう。

観測とデータの整理は卒研、院生など電波物理研究室の構成員全員があたった。ここに皆さんに感謝するとともに、終わられわれの身の回りの面倒をみていただく観測所の竹村夫妻にお礼を申し上げる。

## 文 献

- 1) 芳野越夫, 奥沢隆志, 梶端夫, 上滝実: 電気通信大学学報, 27, (理工学編), pp. 38-43, (Dec., 1969)
- 2) 奥沢隆志, 芳野越夫, 梶端夫, 上滝実: 電気通信大学学報, 27, (理工学編), pp. 45-53, (Dec., 1969)
- 3) Kimpara, K.: *Proc. Res. Inst. Atmos. Nagoya Univ.* 6, pp. 38-43 (1959)
- 4) Helliwell, R. A.: *Whistlers and Related Ionospheric Phenomena*, (Stanford Univ. Press), p. 84 (1964)
- 5) Iwai, A. and J. Otsu: *Proc. Res. Inst. Atmos. Nagoya Univ.* 5, pp. 57-59 (1958)
- 6) Somayajulu, V. V. and B. A. P. Tantry: *J. Geomag. Geoelect.* 20, pp. 21-31 (1968)
- 7) Allcock, G. Mck.: *J. Geophys. Res.* 71 pp. 2279-2283 (1966)
- 8) Allcock, G. Mck. and F. A. McNeil: *J. Geophys. Res.*, 71, pp. 2285-2294 (1966)
- 9) Araki, T. and H. Kamiyama: *Rep. Ionos. Space Res. Japan*, 23, pp. 141-150 (1969)

## 付 録

反射理論による tweek 伝ばん式

地球表面と電離層間を多重反射して伝ばんするとすれば、第  $n$  次反射波の到達時間  $t_n$  は、地球の彎曲を無視して

$$t_n \doteq \{(2nh)^2 + d^2\}^{1/2} / c$$

第  $n$  次波と第  $n-1$  次波の到達時間差の逆数がそのときの周波数  $f_n$  となると考えると、

$$f_n = \frac{c}{\{(2nh)^2 + d^2\}^{1/2} - \{2^2(n-1)^2h^2 + d^2\}^{1/2}}$$

これより

$$n \doteq \frac{d}{2h \sqrt{\left(\frac{2hf_n}{c}\right)^2 - 1}}$$

よって

$$t_n = \frac{d}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{c}{2hf_n}\right)^2}}$$