

ホイッスラ分散値の自動計測 Ⅲ

太田 健次*, 江口 博之*

The Automatic Measurement of the Dispersion of Whistlers Ⅲ

Kenji Ota* and Hiroyuki EGUCHI*

(Received September 16, 1978)

To evaluate the dispersion of Whistlers, the Sonagraph is used in general, but it is difficult to analyze whistlers data by the Sonagraph continuously without delay. By our five channels Phase Locked Loop discriminator, we can measure the rate of the occurrence number and the dispersion of whistlers automatically.

The mean value of the occurrence rate of whistlers measured by the automatic observation amounts to about 25% of that by routine observation. The measured error of the dispersion by our method is about less than $\pm 1 \text{ sec}^{1/2}$. Our experiment proves this equipment can be used to measure the occurrence rate and the dispersion of whistlers for practical purpose. Some data measured by the equipment during magnetic storms are analyzed in this paper.

1. まえがき

ホイッスラは雷放電により放射されたインパルス性の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。ホイッスラの発生頻度と分散特性を調べることににより、電離層及び磁気圏の電子密度とその変動を継続して測定できる¹⁾。ホイッスラの伝搬理論では磁力線に沿って周囲電子密度より濃い部分が磁気圏内に存在し、これがホイッスラの伝搬路(ダクト)として作用しているものと考えられている²⁾。しかしこのダクトの生成と消滅の機構を研究するには分単位でのデータ収集が必要であり、毎時2分間のルーチン観測では十分な解明は得られない。ホイッスラの自動観測は各種の方式が考案されているが³⁾、Phase Locked Loop IC の入力周波数の出力電圧への変換特性を利用した観測装置もその一つである⁴⁾。今回 PLL を5チャンネルに増設し、1977年11月より1978年3月まで連続観測を行ったのでその結果を報告する。

2. 測定原理

PLL IC の周波数-電圧変換特性は直線性が非常によく、出力電圧で入力信号の周波数が正確に求められる。そこでホイッスラが特定周波数 f_1 , f_2 を通過する時間を t_1 , t_2 とし、その時間差を測定することにより分散値が求まる。しかしつぎのような欠点がある⁵⁾。

- (1) ホイッスラの検出率を高めるには f_1 と f_2 の間隔を狭める必要がある。
- (2) 分散値をより正確に測定するには f_1 と f_2 の間隔を広げる必要がある。
- (3) SN 比の悪化にともない分散値に負の測定誤差が増加する。

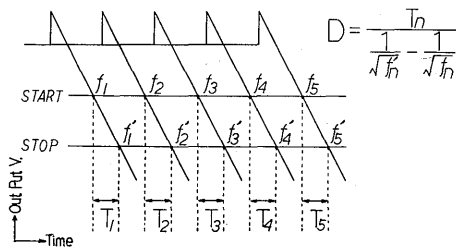
これらの欠点はホイッスラ検出と分散値測定を同一装置で行うことに無理があるので今回はホイッスラ検出と分散値測定を区別し、相反する条件を簡単な附属装置で満足させる観測方法を考案した。

- (A) ホイッスラ検出 (A方式)

PLL の入力信号周波数に対する出力電圧特性はホイッスラが高い周波数より低い周波数へと変化するに、従

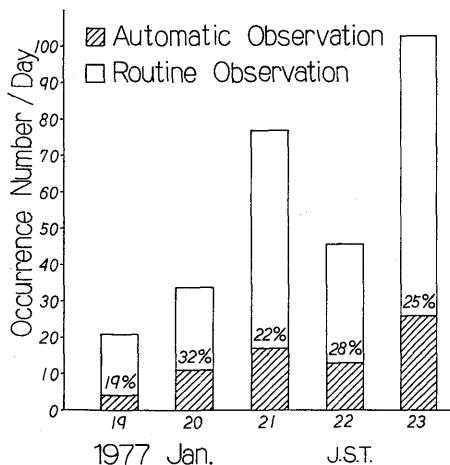
*電子工学科 (Department of Electronic Engineering)

って正電圧から負電圧にホイッスラ分散値の傾きを持って連続的に変化して行く。ここである特定周波数 f_1 及び f'_1 を取り PLL の出力が、それぞれの入力周波数に相当する出力電圧を越えたときコンパレータ回路を用いてホイッスラを検出する。ホイッスラの検出率を高めるにはホイッスラが存在する全周波数帯域で観測することが必要である。この考えを満足するには多数の PLL を用い、その自走周波数を少しずつずらしホイッスラの検出点を多くすればよい。すでに 2ch に PLL を増設しその効果は十分示されていた⁶⁾。今回は第 1 図に示すように



第 1 図 ホイッスラ検出方式

PLL を 5ch に増設し、各々の自走周波数を 6KHz, 5.5 KHz, 5KHz, 4.5KHz, 4KHz に設定した。 f_n で時間差測定器のリセットとスタートを行い、 f'_n でストップ命令と印字命令を出させるようにした。そうするとホイッスラをどのチャンネルの PLL が検出しても、時刻とそのチャンネル数及びスタート、ストップ間の時間差を印字できるようになる。このため f'_n と f_{n+1} は間隔を取らねばならないが、2 台以上の時間差測定器とプリンタを使用するならば f'_n と f_{n+1} は交叉させることも可能である。なおここで分散値を測定しているのは、300ms 以内

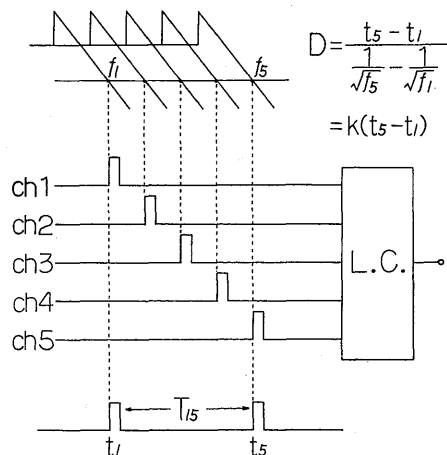


第 2 図 ホイッスラ検出率の一例

に連続してホイッスラが到来し検出された場合は前の分散値を印字させ区別できるようにするためと、ホイッスラ以外のノイズで誤動作した場合それをチェックするため、及び測定器の測定誤差を調べるためである。しかし本来はホイッスラの発生時刻と検出チャンネルのみが必要である。この方式で 1977 年 1 月 19 日より 23 日までのルーチン観測のモデルテープでホイッスラ検出率を調べた。その結果を第 2 図に示す。検出率に変動があるのはホイッスラの受信強度、ホイッスラの種類等によるものと考えられるが平均 25% 以上の検出率があり 2ch の場合より改良された⁷⁾。

(B) 分散値測定 (B方式)

検出したホイッスラについてすべて分散値を正確に求めるのが理想であるが、自動観測でこれを測定することは困難である。今回のように 5ch で検出率を高めた場合は一部分のホイッスラ成分で検出を行っているので不可能に近い。しかしホイッスラは単一で発生する場合は極めてまれであり、同一のダクトを通り多数のホイッスラが到来すると考えられるので同一時間に発生し、同一ダクトを通ったホイッスラは同一の分散値を持つ。それ故そのホイッスラ群から SN 比の良好なホイッスラの分散値を測定した方が測定誤差が少なくなる。ホイッスラの特定周波数 f_1, f_2 に対応する PLL の出力電圧 V_1, V_2 を越える時間を t_1, t_2 としその時間差 ($t_2 - t_1$) を測定すれば分散値が求まるが同一 PLL で V_1, V_2 を設定すると V_2 を十分に越える出力電圧を得られない SN 比の弱いホイッスラは分散値に負の測定誤差を持つのはすでに知られていた⁶⁾。また測定誤差を少なくするには当然 f_1, f_2 の間隔を大きく取る必要があるが同一 PLL で f_2



第 3 図 分散値測定方式

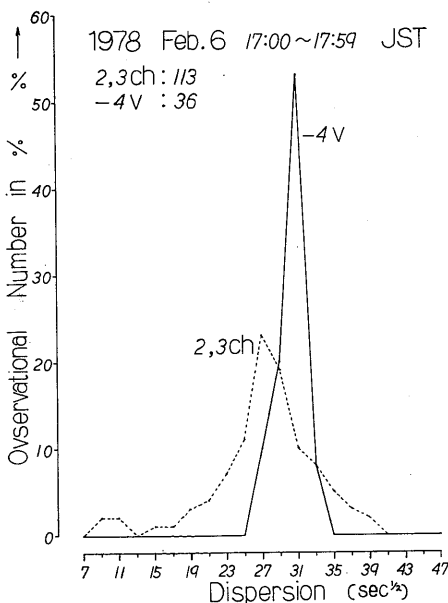
を設定すると f_2 に対応する V_2 を越えるSN比の良好なホイッスラはさらに少なくなってしまう。これらの問題を解決するのが第3図に示す5chのPLLによる測定法である。各チャンネルにおけるPLLの自走周波数を(A)方式の場合と同様にずらしておき、同一基準電圧に対応する入力信号の周波数をそれぞれ f_1, f_2, f_3, f_4, f_5 とする。各チャンネルにおいてホイッスラが到来し、その周波数が f_1 を通過したとき第1chのPLL出力電圧が基準電圧を越えることによりパルスが発生させる。次に f_2 を通過したとき第2chのPLLが基準電圧を越えパルスが発生する。以下順に第5chまでパルスが発生させ、そのパルスを論理回路に入れ、第1chより第5chまで順に到来したものをホイッスラと見なすことにする。分散値は第1chのパルスが発生した時間 t_1 と第5chのパルスが発生した時間 t_5 の差($t_5 - t_1$)を測定して求める。一般空電雑音で各チャンネルのPLL出力電圧が基準電圧を越えることはありうるが、そのとき発生するパルスが短時間に第1chより第5chまで順番に発生する確率は極めて小さい。しかし誤測定を防ぐため時間差測定器の表示部より信号を取り出し4桁及び5桁目が0のとき(分散値がホイッスラと考えられないほど小さいとき)及び6桁目に0以外の数字が表示されるか、オーバフロー表示があるとき(分散値がホイッスラと考えられないほど大きいとき)はプリンタの印字指令が出ないように安全策を取っている。基準電圧の設定により誤動作率や分散値測定誤差が異なるが(A)方式で検出したホイッスラの

25%以上を測定し、測定誤差が分散値で ± 1 以内に入るようにするため現在は(A)方式のスタート電圧($-4V$)と同一にしてある。第4図に測定の一例を示す。

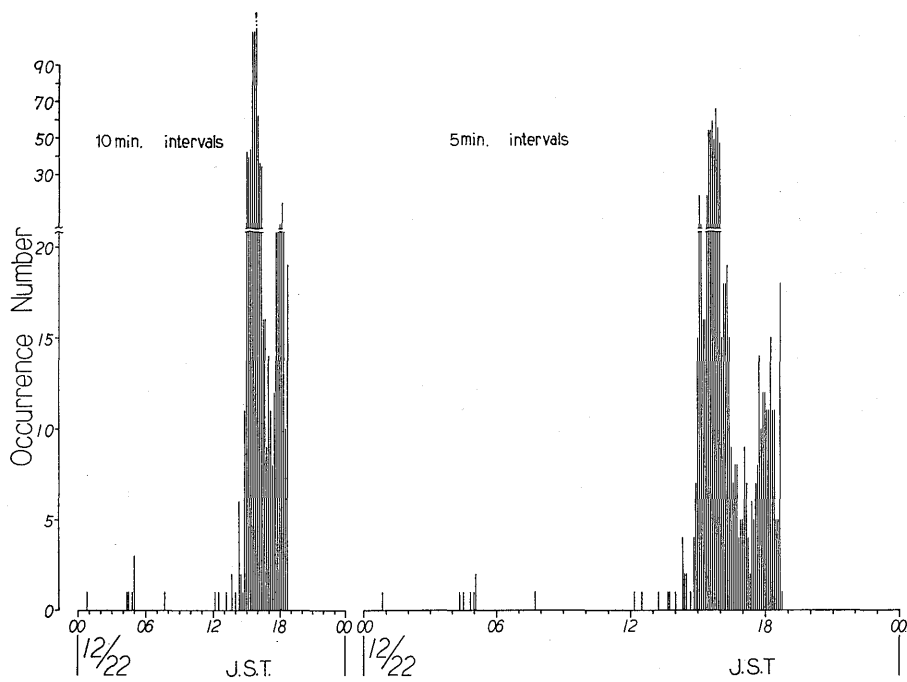
ここで $-4V$ と示したのがこの方式であり、2, 3chと示したのが(A)方式で2ch, 3chの分散値をグラフにしたものである。このときのソナグラフによる分散値測定では30から32であり(B)方式では測定されたホイッスラ36個の53%が31に集中し測定誤差の少ないことを示している。一方2, 3chで示される(A)方式ではホイッスラの検出率を高めるのが目的であるため f_n と f'_n の間隔を狭く取っており分散値の測定誤差が生じるのは当然であるが実際の分散値より小さくなるのは検出可能な最低SN比に相当するホイッスラが含まれるためである。なお1ch, 4ch, 5chを省略したのは分散値がより多くの測定誤差を含むためと(A)方式が分散値測定を本来の目的としていないので2ch, 3chで代表するにとどめた。(B)方式の測定誤差が小さい主な理由は f_1 と f_5 の間隔が広く取れ、SN比の小さいホイッスラが到来した場合は第1chから第5chまですべてパルスが出るとは限らないので印字指令が出ない、またすべてのチャンネルで基準電圧を越えパルスが発生した場合でも同一基準電圧であるため第1chから第5chまで同一の測定誤差を持ち($t_5 - t_1$)でその誤差が差し引かれるためと考えられる。しかしながらこの方式でホイッスラ検出の基準電圧を0Vに近づけた場合分散値測定個数が多くなると思われるが実際は誤動作が多くなる。これはホイッスラが到来し、第1chより第5chまで順番にパルスが発生しうる状態であってもこの時間内に一般空電雑音が発生した場合は基準電圧が低いため、この雑音によりPLLの出力電圧が変動し、誤動作の原因となるパルスが発生する。よって第1chから第5chの順番に発生するパルスに誤動作のパルスが割り込みを行い、結果として動作させるパルスの順番を狂わせる。また逆に基準電圧を0Vより下げればそれにしたがって測定個数はしだいに減少して行く。よって現在は $-4V$ に基準電圧を設定している。

3. 観測結果

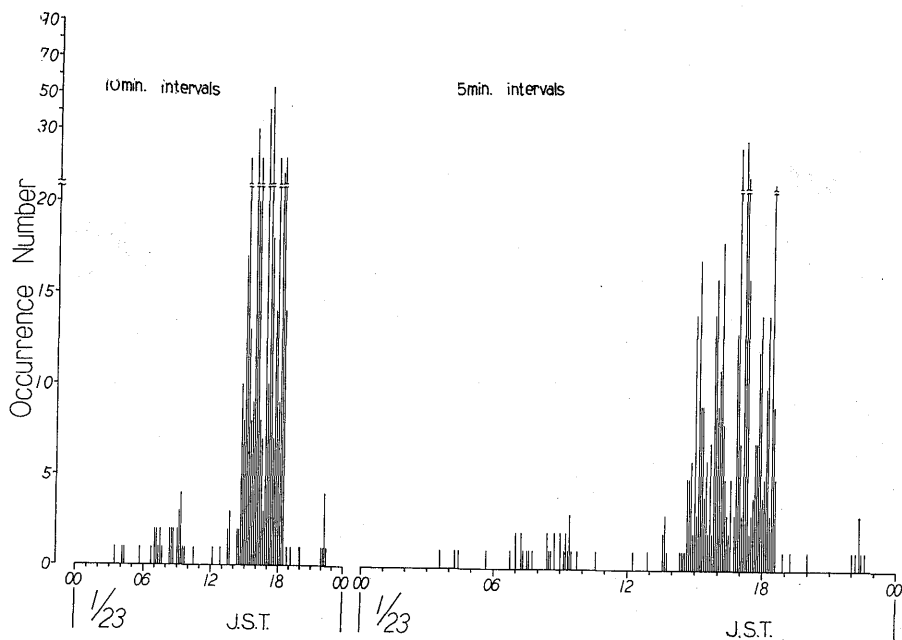
(1) 1977年11月1日より1978年3月31日までこれらの方式でホイッスラ検出及び分散値測定の自動観測を行った。第5図に12月22日、第6図に1月23日の検出できたホイッスラの発生頻度を示す。各図とも時刻はJSTで表わし左図は10分単位に検出したホイッスラの個数で右図は5分単位の個数をグラフにしたものである。12月22日の場合は15時50分と18時10分においてホイッスラ発生数にピークが見られる。各ピークにおいてはほぼガウス分



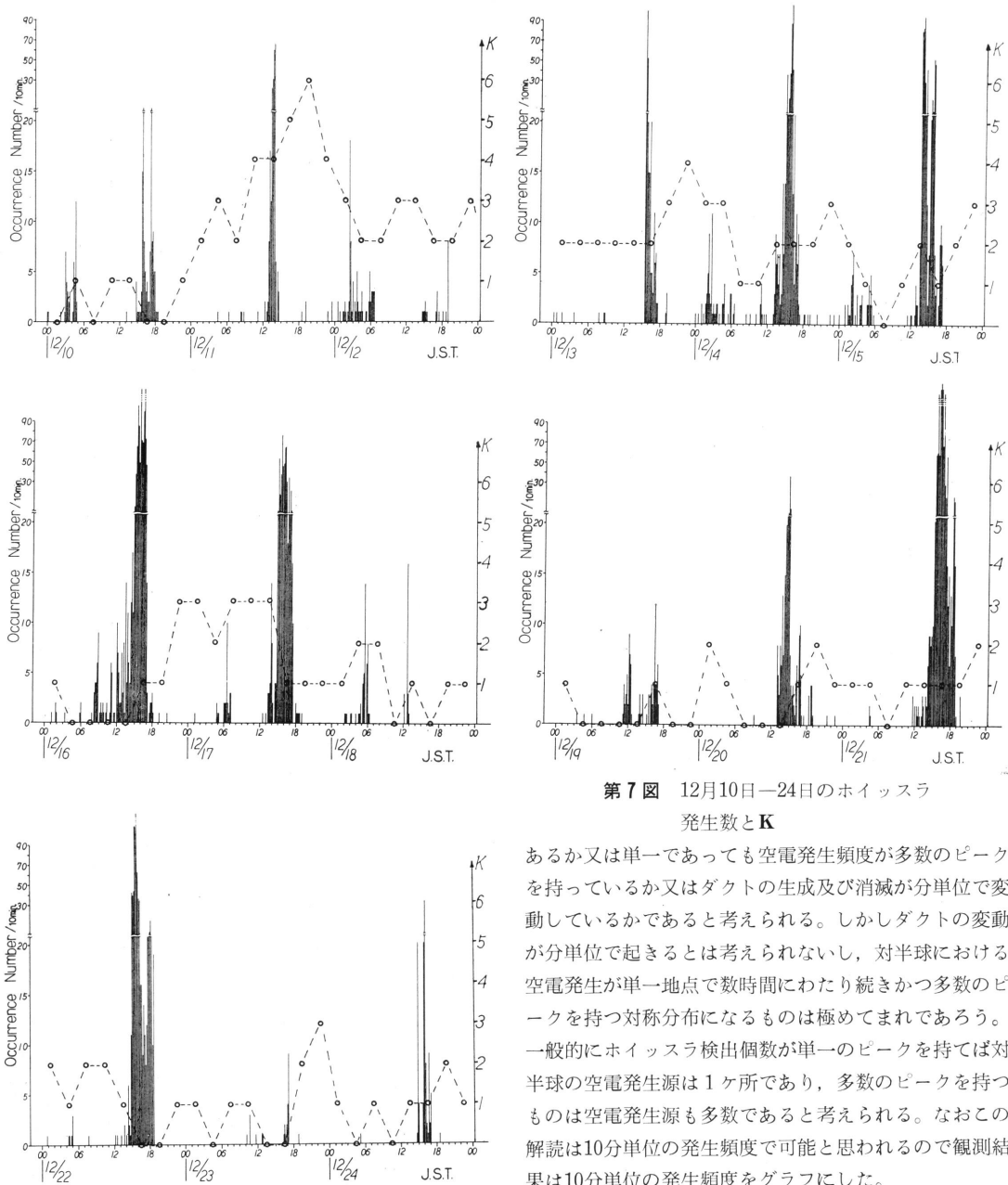
第4図 分散値測定の一例



第5図 12月22日のホイッスラ発生数



第6図 1月23日のホイッスラ発生数



第7図 12月10日—24日のホイッスラ

発生数とK

あるか又は単一であっても空電発生頻度が多数のピークを持っているか又はダクトの生成及び消滅が分単位で変動しているかであると考えられる。しかしダクトの変動が分単位で起きるとは考えられないし、対半球における空電発生が単一地点で数時間にわたり続きかつ多数のピークを持つ対称分布になるものは極めてまれであろう。一般的にホイッスラ検出個数が単一のピークを持てば対半球の空電発生源は1ヶ所であり、多数のピークを持つものは空電発生源も多数であると考えられる。なおこの解釈は10分単位の発生頻度で可能と思われるので観測結果は10分単位の発生頻度をグラフにした。

(2) 対半球における空電源の存在がホイッスラ発生の第一条件である。しかしホイッスラは磁気圏内でダクト伝搬すると考えられ、このダクトの生成と消滅を解明するにはホイッスラの自動観測で発生頻度を連続して調べる必要があろう。この期間中においても磁気擾乱時におけるホイッスラ発生頻度のデータを収集できた。

磁気擾乱の大きさを表わすものとしてK指数が用いられており3時間ごとにおける磁気擾乱の度合を0～9

布である。これは、ホイッスラ発生源である対半球地点における空電発生地が単一でありかつ空電活動がガウス分布で発生しているか又はダクトの生成と消滅がガウス分布でなされているかである。一方1月23日の例では検出されたホイッスラ個数は、全体として15時30分と17時40分頃に中心を持つが細かに見るとその中で数個のピークを持ち、各ピークを中心にして対称形で分布しているのが判る。この場合対半球地点における空電源が数ヶ所

までの段階に分け、一日の総合を ΣK で示すものである⁸⁾。観測期間中 ΣK が30以上になったのは12月2日 $\Sigma K=31$, 12月11日 $\Sigma K=30$, 1月5日 $\Sigma K=33$, 1月6日 $\Sigma K=30$, 1月10日 $\Sigma K=30$, 1月29日 $\Sigma K=30$, 1月30日 $\Sigma K=32$, 2月15日 $\Sigma K=33$, 2月28日 $\Sigma K=30$, 3月2日 $\Sigma K=30$, 3月27日 $\Sigma K=37$, であり3時間毎における K に6が存在したのは12月11日, 1月5日, 1月6日, 1月30日, 2月15日であった。但し K はすべて柿岡のデータを使用した。

よって ΣK が30以上でかつ K に6を含む12月11日, 1月5日, 1月6日, 1月30日, 2月15日及び ΣK が期間中最大であった3月27日について検討する。

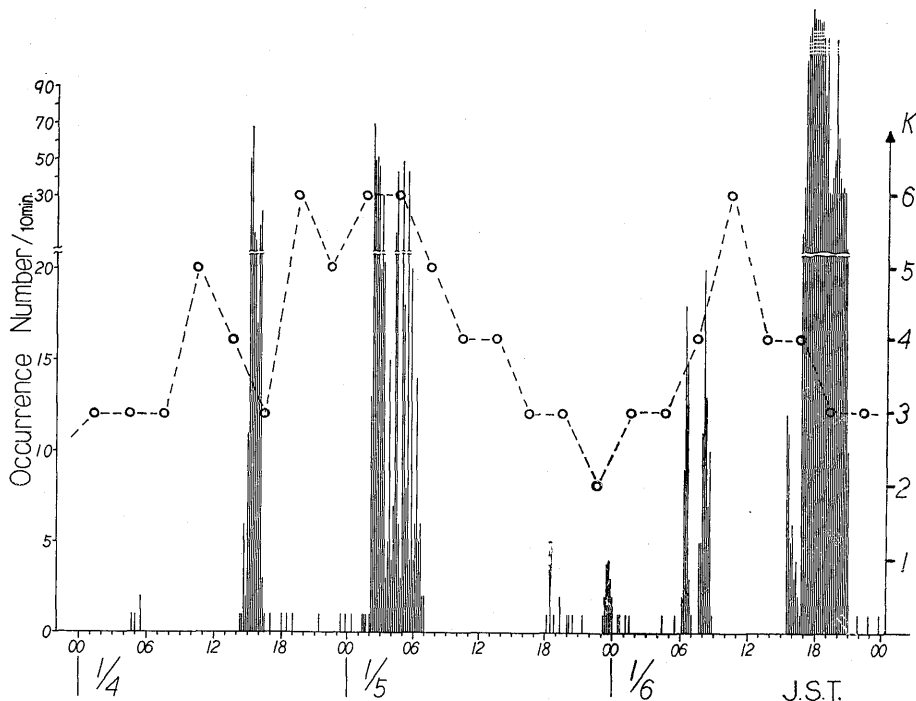
第7図に12月10日より24日までのホイッスラ発生頻度と K 指数の関係を示す。

12月2日における $\Sigma K=31$ の磁気擾乱以来減少していた K は11日5時4分に始まった磁気嵐により増加し始め18時より21時までに $K=6$ を示し以後減少して行く。この磁気嵐後 K は減少し安定状態であるにもかかわらずホイッスラの発生頻度は日増しに増加し16日には1日当り1173個のホイッスラを検出し, 21日には1273個に達した。この状態は12月22日18時40分まで続き, それ以後急激にホイッスラの検出個数は減少し1月3日までほとんどホイッスラは検出されなかった。これは磁気擾乱によりホ

イッスラの伝搬条件が良くなり検出されるホイッスラの個数が多くなったものと思われるが注目すべき点は一度作られた伝搬条件は磁気擾乱がおさまっても継続されたことは少なくとも12日間は良好な伝搬路が確保されていたことを示している。しかし磁気嵐以前にも少量ながらホイッスラが検出されており12月11日12時40分より始まるホイッスラ群がこの磁気嵐によって初めて影響を受けたものかどうかは明らかでない。これと同様な結果を示したのが2月15日であった。

第8図に1月4日より6日までのホイッスラの発生頻度と K 指数の関係を示す。

12月11日の $\Sigma K=30$ を最大に以後しだいに減少していた ΣK は1月4日5時42分に始まる磁気嵐によってしだいに増加し4日 $\Sigma K=27$, 5日 $\Sigma K=33$, 6日 $\Sigma K=30$ と続く。これにより1月4日14時20分よりホイッスラが検出され始め1月6日には2984個も検出された。注目すべき点は12月11日の場合と異なり磁気嵐の始まる10日も以前よりホイッスラがほとんど検出されていなかったことより, 1月4日14時20分から始まるホイッスラは4日5時42分に始まる磁気嵐によって影響されたと考えられる。このことにより磁気嵐の始った4日5時42分より計算すると9時間以内でホイッスラ伝搬路が生成されたことになる。これと同様な結果を示したのが3月27日であ



第8図 1月4日ー6日のホイッスラ発生数と K

る。またホイッスラは一般に朝方と夕方に多く発生するが1月5日夕方にはほとんど検出されないのはたまたま対半球地点における空電活動が少ないことによると思われる。これは1月30日の場合からも考えられる。1月29日3時53分に始る磁気嵐はその日 $\Sigma K=30$ に達し30日に $\Sigma K=32$ となりそれ以後しだいに減少して行くがこの期間、ホイッスラはほとんど検出されず検出の増加が見られたのは2月6日以降であった。これはルーチン観測のデータからも確認されている。このことより磁気嵐が発生しても対半球の空電活動の状態によってはホイッスラの発生が見られないこともありうる⁹⁾。

4. むすび

磁気擾乱時におけるホイッスラ特性は古くより注目されている^{10), 11)}。しかしホイッスラ伝搬路の生成と消滅の解明にはより多くのデータを収集し、一層細かに研究する必要があるので磁気擾乱時の連続観測をさらに続けたいと思っている。今期間中によって連続観測されたデータよりつぎの事項が考えられる。

- (1) 磁気嵐の発生にともないホイッスラの磁気圏における伝搬路が生成され、その状態は10日から15日近くも継続しうる。
- (2) 磁気嵐の始った時刻より伝搬路が生成されるまでの時間は10時間以内の場合もある。
- (3) 磁気嵐の大きさとホイッスラ発生頻度とはかならずしも比例しない。
- (4) 磁気嵐が発生してもホイッスラがほとんど検出されない場合もあるがこれは対半球における空電活動の状態によるものと考えられる。

5. 謝 辞

この研究は本学における特別研究費の御援助によるも

のであり、大学当局と金原 淳教授の御尽力に厚く感謝する。また各種の観測データを提供し、御検討いただいた米沢利之教授、栗本計起講師、武知英明技術員に感謝する。

なお本装置の試作及びデータ整理にあたり52年度卒業研究生梅村君、出口君、広江君、森谷君、松原君の協力に謝意を表す。

文 献

- 1) Helliwell: Whistlers and Related Ionospheric Phenomena, Stanford Press (1965)
- 2) Smith, R.L: Propagation characteristics of whistlers trapped in field-aligned columns of enhanced ionization, J. Geophys. Res. 66, 3699 (1961)
- 3) 岡田, 岩井, 大津, 佐藤: ホイッスラの発生ひん度と分散の実時間測定装置, 信学論B, 昭和51年1月
- 4) 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B, 昭和51年10月
- 5) 太田, 江口: ホイッスラの発生頻度と分散値の自動観測, 電子通信学会アンテナ伝搬研究会資料, A.P 77-111
- 6) 太田, 江口: ホイッスラ分散値の自動計測Ⅱ, 中部工大紀要, 第13巻A
- 7) 太田, 江口: ホイッスラの自動観測, 信学論B, 昭和53年6月
- 8) K. DAVIES, 糟谷訳: 電離層電波伝搬, コロナ社 (昭和41年)
- 9) Yoshino: Low-Latitude Whistlers and Cloud Distributions in the Conjugate Area, J. Geophys. Res. 81, 4793 (1976)
- 10) Kimpara, A.: On some remarkable characteristics of whistling atmospherics, Rep. Ionosph. Space Res. Japan, 14, 160 (1960)
- 11) Otsu, J. and Iwai, A.: Some correlation between occurrence rate and dispersion of whistlers at lower latitudes and magnetic activity, Proc. Res. Inst. Atmosph. Nagoya Univ. 9, 19 (1962)