

電離層内における VLF 帯電波観測*

早川 正士**・大津 仁助**・岩井 章**

要 約

本論文では K-9M-26 号機のホイッスラ観測結果と L-3H-3 号機による電波雑音について述べる. K-9M-26 号機で受信された short fractional-hop whistler の分散の高度に対する変化から電子密度分布が測定され, また通常のホイッスラ観測から低緯度ホイッスラは電離層突き抜けが困難で, 磁気圏内を往復運動していることが示される. L-3H-3 号機についてはプリセッションで変調をうけた電波雑音について述べる.

1. ま え が き

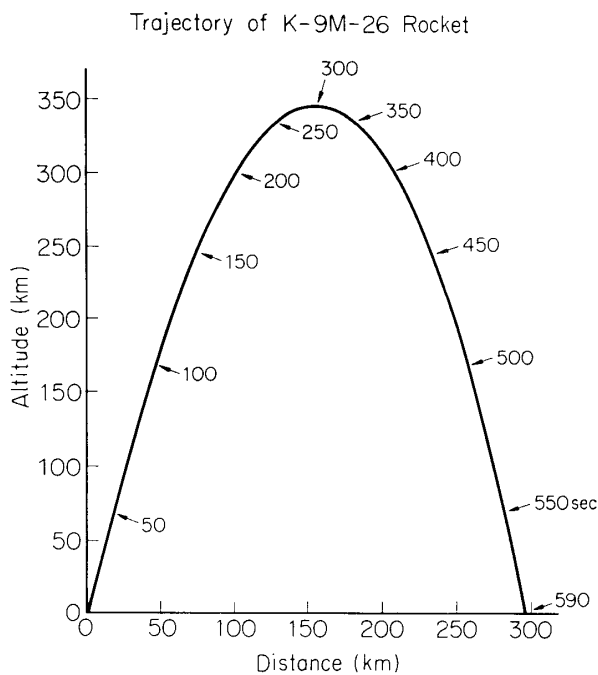
電離層あるいは超高層内における ELF-VLF 帯電波観測の対象となるのは, ホイッスラや VLF 放射のような比較的早くから知られている現象のほか, 最近発見されたイオン・ホイッスラ [1] やイオン静電波 [2] [3] である. ホイッスラは超高層の電子密度分布を推定する有力な手段となっており, VLF 放射は磁気圏内における荷電粒子の運動に関する情報をわれわれに提供する. またイオン・ホイッスラはそのクロスオーバ周波数からイオンの密度を知ることが可能であり, イオン静電波はエネルギー伝送量が多く, 粒子との相互作用が強く, しかも電子やイオンの熱運動の解明に役立つ. 以上の超高層物理の立場のほかに, 電波伝ぱんの面から見ても, イオン・ホイッスラやイオン静電波は電離層内においてしか観測できないので, ロケットや人工衛星による観測が必要となる. これに対してホイッスラや VLF 放射は電離層を通過して地上においても観測される. しかし VLF 電波の電離層突き抜けや電離層のしゃへい効果は非常に興味ある問題であるにもかかわらず十分に解決されているとはいえない. このためにもロケットによる直接観測が重要となる. 本論においてはホイッスラの電離層突き抜けについて重要な情報が得られた K-9M-26 号機の観測結果, および L-3H-3 号機により観測されたプリセッションによる変調をうけた電波について述べることとする.

2. K-9M-26 号機によるホイッスラ観測結果

K-9M-26 号機は雑音電波受信専用機であり, 将来の能動的実験に備え, 親ロケットの頭部に子ロケットが格納されており, 電離層内で秒速数 m の速度で放出する方式が採用された. 親, 子両ロケットとも 100 Hz~15 kHz の広帯域テレメータが搭載されており, 全く同

* 宇宙研特別事業費による研究論文

** 名古屋大学空電研究所



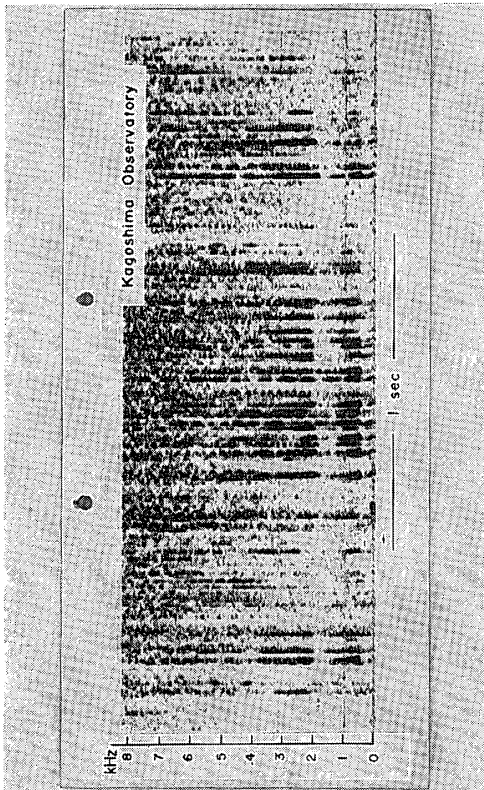
第1図 K-9M-26号機の飛行軌道

観測所から打ち上げられ、その軌道は第1図に示すように最高高度 346 km に達し、観測は約 450 秒間行なわれた。アンテナ展張後から地上の空電がホイッスラモードとして電離層内に侵入した、いわゆる short fractional-hop whistler が、非常に数多く受信された。これは打ち上げ時期が夏であったことと、幸いにも打ち上げ前後数日間は鹿児島地方の雷活動が活発であったためである。このことは第2図を見ても明瞭なように1秒間に数十個というような高い空電ひん度を示している。図中の空電は17時という打ち上げ時刻のため電離層下部における吸収が大きいため電離層・地表導波管伝ぱんの際受ける 2 kHz 前後のローワ・カットオフを持たないことから、これらの空電が鹿児島地方に発生したもので、遠距離から伝ぱんしてきたものとは考えられない。これら空電が電離層内に透過し、高度とともにホイッスラの分散が増大していく様相が第3図から第5図において明らかに理解できる。分散の高度に対する変化を詳しく知るために、テープレコーダとソナグラフの適当な操作により時間軸を大体十数倍に引き伸ばし、二つの周波数成分の時間差より分散をかなりの精度で測定することができた。Short fractional-hop whistler は打ち上げ 90 秒後から、高度にして約 150 km 以高、また下降時にも1秒間に10個前後ずつは観測され、解析は1秒間に少なくとも数個のホイッスラを取り出し行なった。第6図 a, b は解析した分散の各 5 km ごとの平均値の高度に対する依存性を上昇時、下降時について描いたものである。さてホイッスラの各周波数のイニシャルパルスからの到着時間 $t(f)$ は次式のように与えられる。

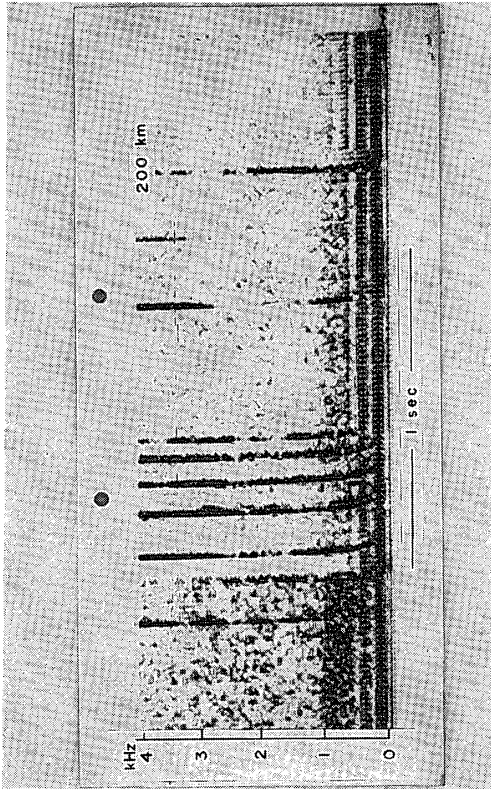
$$t(f) = \frac{1}{c} \int M'(f) ds \quad (1)$$

ただし ds は伝ぱん路要素、 $M'(f)$ は group-ray refractive index で、解析を行なった高度

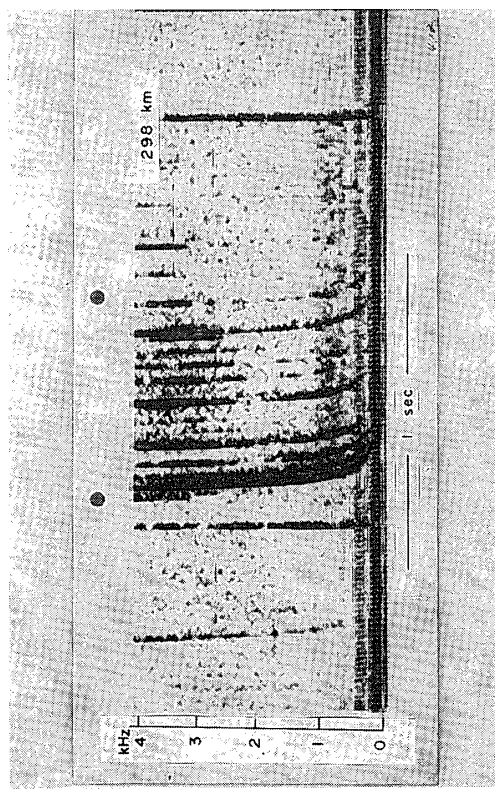
じ観測を行なった。子ロケットの場合には、じょう乱域がせまいので、アンテナに対する影響は少なくなることが予想される。またじょう乱の影響の検出のために、親ロケットに長さを異にするモノポールアンテナとロケット軸方向に頭部より突出すアンテナが用意されていた。また、モノポールアンテナの 740 Hz と 3.5 kHz のインピーダンスの測定を行なってプラズマ内のインピーダンスを知り、正確な電界強度の測定を期した。以下ではこのうち親ロケットの広帯域観測の結果だけを示す。広帯域受信アンテナは時分割で、ループ、ホイップおよび球アンテナを使用した。本機は 1969 年 8 月 24 日 17: 03 JST に東大鹿児島宇宙空間



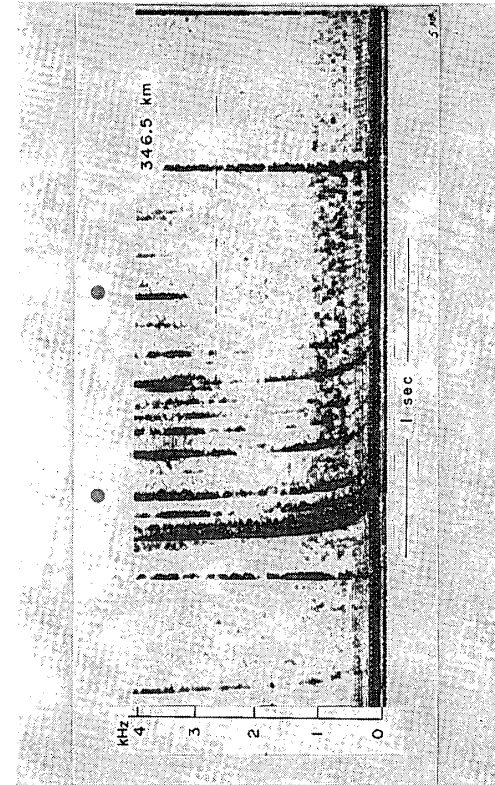
第 2 図 打ち上げ時の空電研究所鹿兒島観測所における同時観測結果



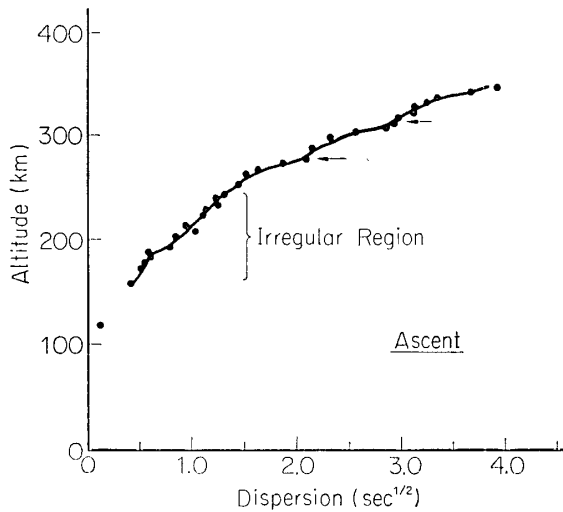
第 3 図 高度 200 km において観測された short fractional-hop whistler



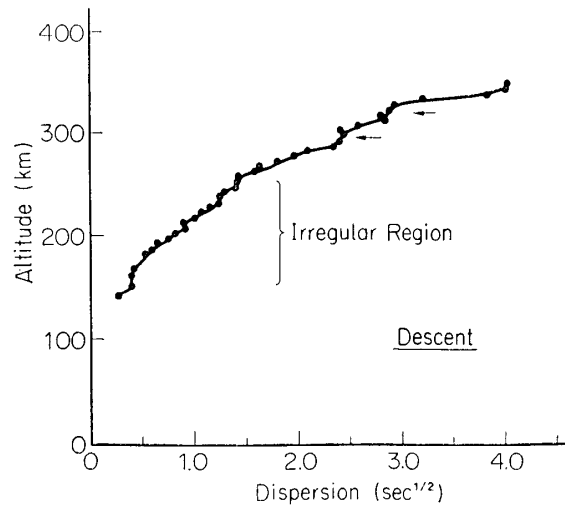
第 4 図 高度 298 km において観測された short fractional-hop whistler



第 5 図 最高到達高度 346.5 km において観測された short fractional-hop whistler



第6図(a) 上昇時における short fractional-hop whistler の分散の高度に対する依存性



第6図(b) 下降時における short fractional-hop whistler の分散の高度に対する依存性

では $y \gg 1$, $x/y \gg 1$ の条件と QL 近似が成立するので次式にて近似できる.

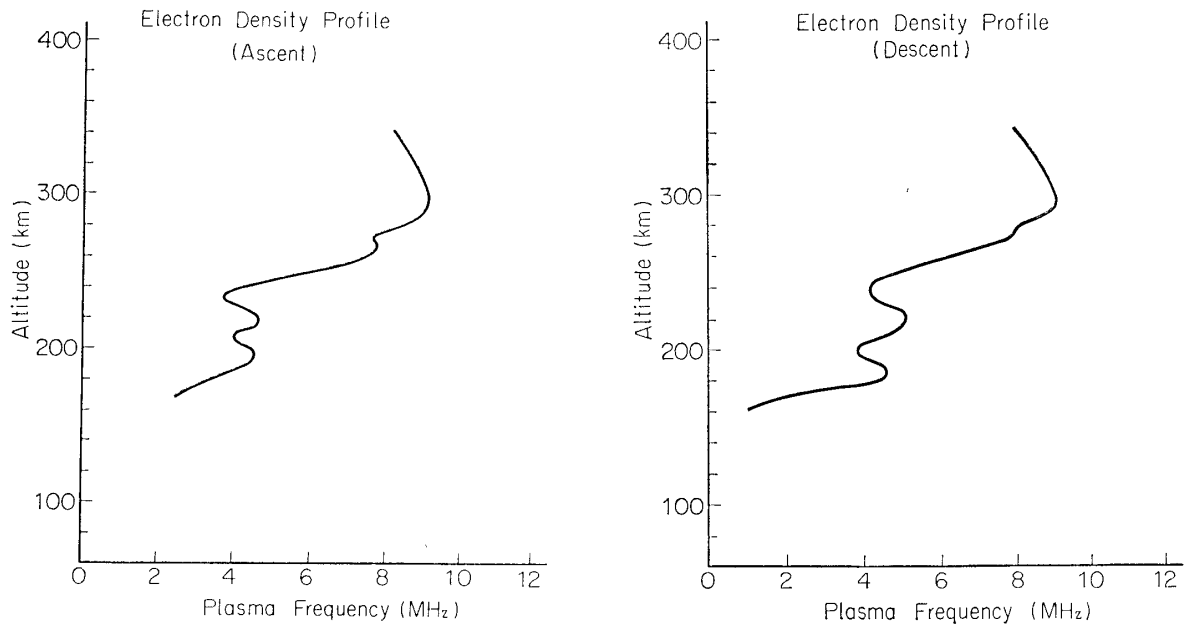
$$M'(f) \approx \frac{1}{2} \sqrt{\frac{x}{y}} \left[\frac{\cos \alpha}{\cos \theta} \right] \quad (2)$$

ここで, x は電子プラズマ周波数 f_o の電波周波数 f に対する比の2乗, y は電子ジャイロ周波数 f_H の電波周波数 f に対する比を表わし, θ , α はそれぞれ波面法線とレイ方向が磁場となす角を示す. すると分散 D は次式にて定義できる.

$$t(f) = D \times f^{-1/2} \quad (3)$$

$$D = \frac{1}{2c} \int \frac{f_o}{\sqrt{f_H}} \left(\frac{\cos \alpha}{\sqrt{\cos \theta}} \right) ds \quad (4)$$

ホイッスラの屈折率は大気中と電離層内では著しく異なるのでスネルの法則より, short fractional-hop whistler の波面法線は鉛直方向を向くと考えられ, 打ち上げ地点では, したがって $\theta \approx 45^\circ$ となる. このときには(4)式内のかこの項は1と近似できる. しかし伝ぱん路は不明であるが, レイ方向は磁場に沿っているとして分散の変化より電子密度プロファイルを計算したのが第7図 a, b である. この際の分散の高度に対する変化は各高度の前後 15 km にわたっての平均値を用いた. まず第6図 a, b を見ると上昇時には 290, 310 km 付近また下降時にも大体同じ高度において分散が急激に変化している. これらの分散の変化は伝ぱん路の多様性によっては説明しがたく, 電離層の層状構造を反映しているものと思われる. また 220 km 以下の高度領域はかなりふらつきが多い不規則な領域のように思われる. このことは第7 a, b 図の電子密度分布にもはっきりと表われている. なお全体のプロファイルも非常に合理的なものと考えられる. この電子密度測定は電波伝ぱんを用いた測定法の範ちゅうに属するものである. short fractional-hop whistler に関して残された問題は, その強度の高度に対する変化の様相とモデル電離層について波動理論を用いた電界強度の高さに対する依存性との対比を行なうことである [4].

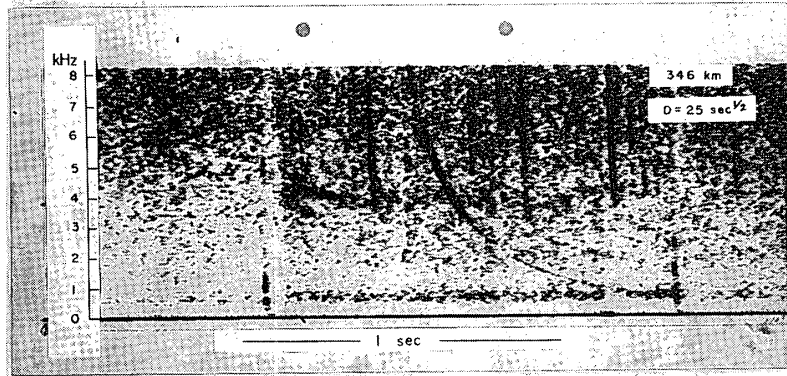


第 7 図 (a) 上昇時における電子密度プロファイル 第 7 図 (b) 下降時における電子密度プロファイル

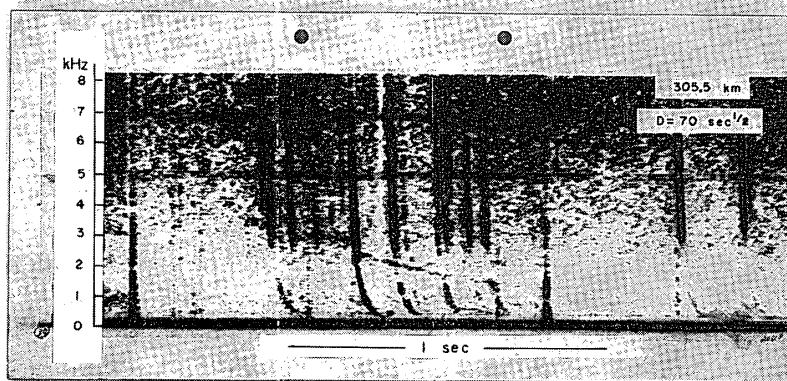
次に通常のホイッスラの観測結果の検討に移る. 全飛しょう時間中約 50 個のホイッスラが受信された. しかしさきに述べた short fractional-hop whistler の強度が非常に強いためこれらのホイッスラの解析は困難であった. 観測された数例を第 8 図から第 10 図に示す. 第 8 図は最高高度付近において観測されたもので, 分散は最も小さく $25 \text{ sec}^{1/2}$ である. 第 9 図は分散 $70 \text{ sec}^{1/2}$ のホイッスラの低周波域が short fractional-hop whistler の強度に比して弱い強度で現われており, 第 10 図は $90 \text{ sec}^{1/2}$ という最も分散の大きく, しかもディフューズしたホイッスラのソナグラムである. なお空電研究所鹿児島観測所における同時観測ではホイッスラは受信できなかった. ホイッスラ分散の高度変化をプロットしたのが第 11 図である. まず一見して理解できることは非常に分散が散らばり, しかも分散の大きいホイッスラが多いことである. 次にいえることは高度 300 km 以上においてホイッスラの密度分布が著しく高いことである. これらの事実は低緯度ホイッスラの伝ぱんにとって重要な問題である. 分散が $25 \sim 30 \text{ sec}^{1/2}$ のホイッスラは冬という弱い雷活動時期の南半球から発したものと考えられる [3]. しかしそれ以外のホイッスラは鹿児島地方の激しい空電に源を求めるのは妥当であるが, かかる大きい分散はどのように理解するかは興味深い. もしダクト伝ぱんだと仮定すれば, 第 11 図の結果とは異なり, 磁気圏内のワン・ホップに対応する分散の 2 倍の間隔ごとに大体ホイッスラ分散が分布することが期待される. よって以下では非ダクト伝ぱんをレイ・トレーシングを行なった結果により議論を進める. レイ・トレーシングの際には超高層電子密度分布を仮定するの必要があり, 次に示すプロファイルを使用した.

$$N = N_{10} \exp\{-k_1(r - r_h)\} + k_{N0} N_{10} \left(\frac{r_0}{r}\right)^3 \exp\left(\frac{r_0}{r} k_2\right)$$

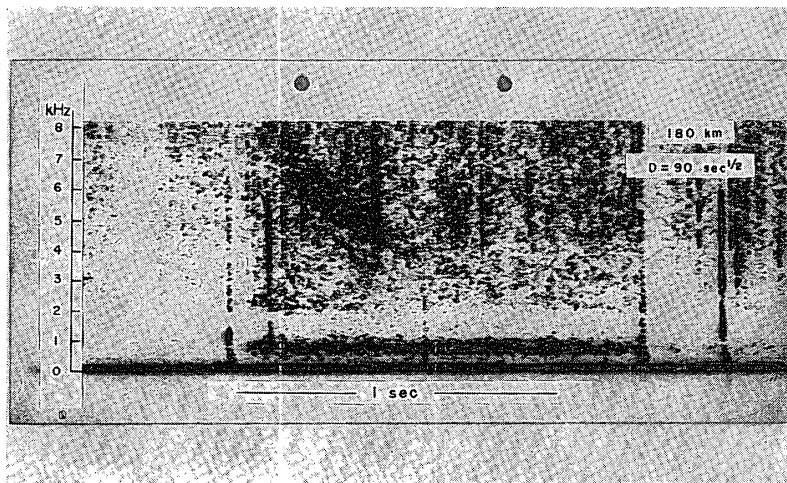
ただし $r_0 = 637 \text{ km}$, $r_h = 6670 \text{ km}$, $k_{N0} = 2.5 \times 10^{-3}$, $k_2 = 0.3$ そして k_1 は変数である. 上式



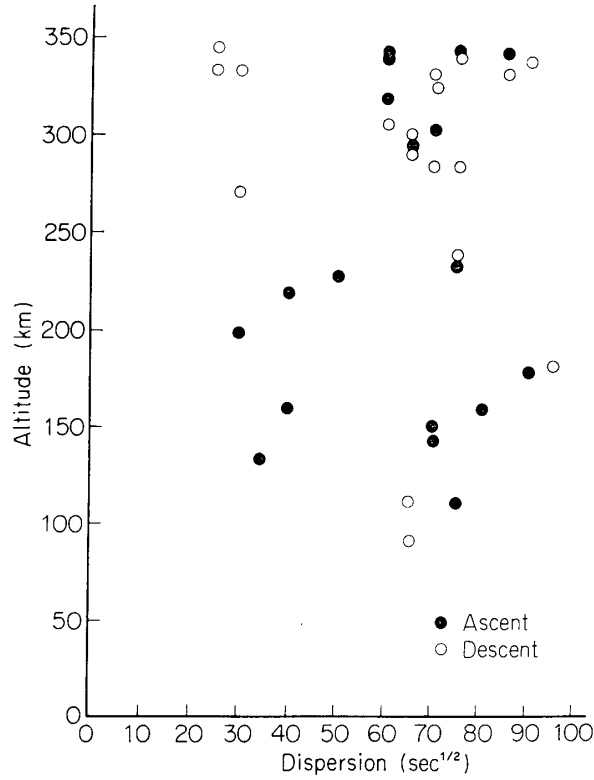
第 8 図 ホイッスラ・ソナグラム (分散 $25 \text{ sec}^{1/2}$, 高度 346 km)



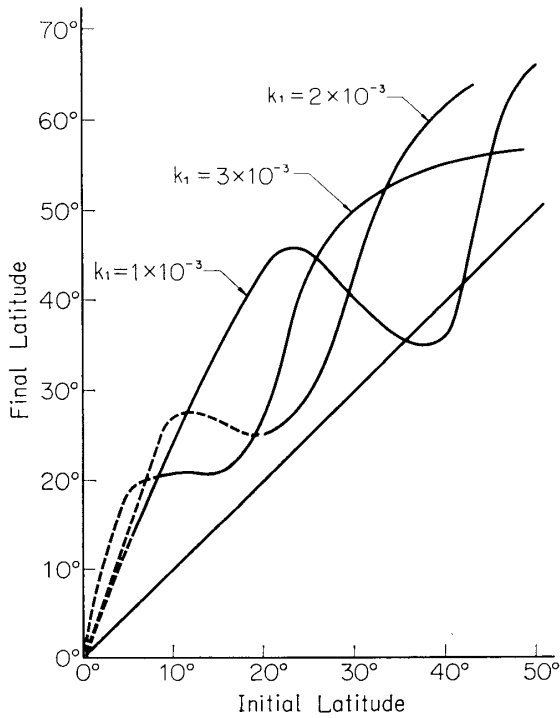
第 9 図 ホイッスラ・ソナグラム (分散 $70 \text{ sec}^{1/2}$, 高度 305.5 km)



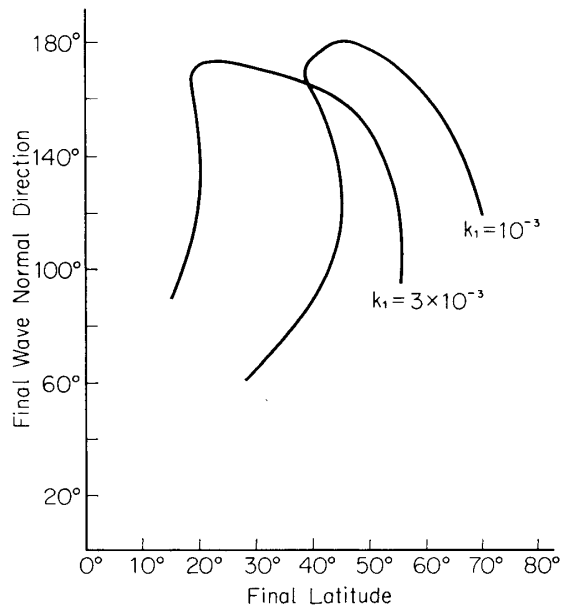
第 10 図 ホイッスラ・ソナグラム (分散 $90 \text{ sec}^{1/2}$, 高度 180 km)



第 11 図 ホイッスラ分散の高度に対する変化



第 12 図 発射点緯度と下降点緯度との関係

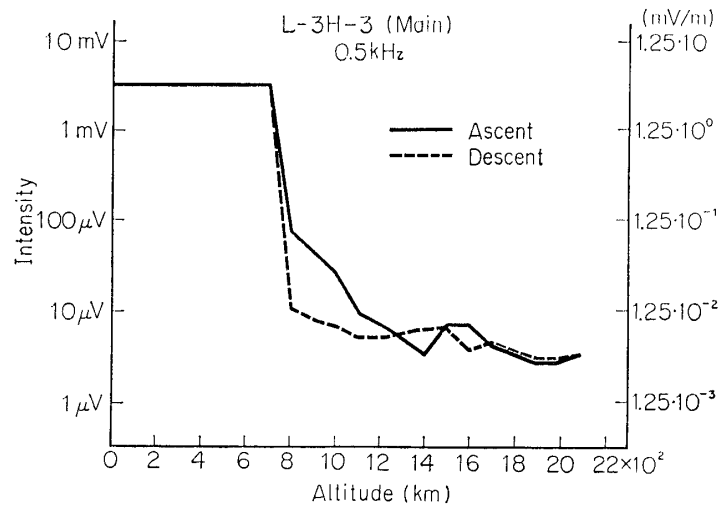


第 13 図 下降点緯度における電波の波面法線の変化

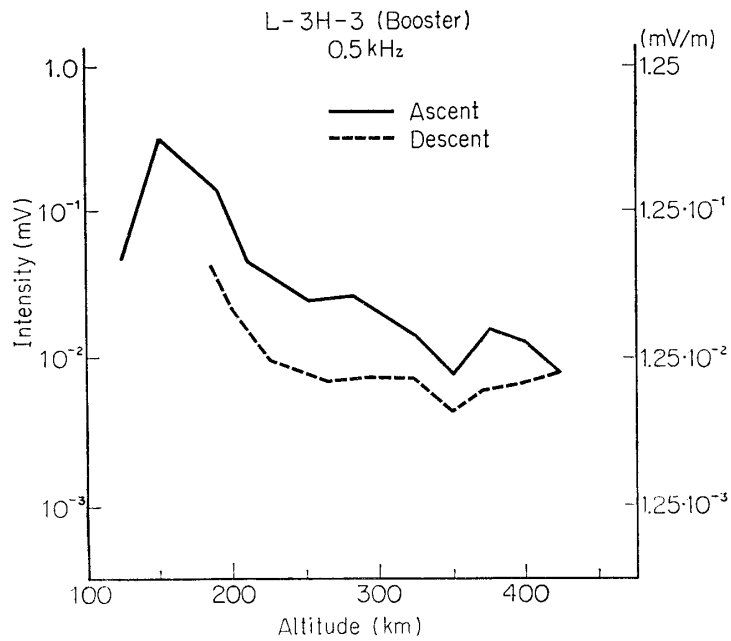
では電子密度を酸素イオンとプロトンの和と考え、第1項は酸素イオン分布を、第2項はプロトン分布を表わす。したがって第1項は高度とともに急激に減少し、低緯度ホイッスラには重要な効果を示すので k_1 をパラメータとした。レイ・トレーシングは高度 300 km 以上において行なわれ、初期条件として波面法線は鉛直という仮定のもとにおける計算結果が第12図に示されている。第12図は初期緯度に対する下降点緯度の関係を表わし、いわゆるポーラ・クリープ性伝ばんを明示している。これによると鹿児島県くらいの磁気緯度 20° 付近で観測されたものは南半球の 10° 付近から発したものといえる。しかし到達した高度 300 km くらいにおいての突き抜け条件を吟味する必要があり、その問題が第13図に描かれている。つまりワン・ホップ伝ばんしてきたホイッスラの下降点緯度とその緯度における波面法線方向の関係を示したもので、角度は鉛直上方から測ったものである。したがって波面結線方向が 180° に近いときには最大電子密度領域を透過して地表へ向かうが、 180° からかなり離れると反射することとなる。第13図中の k_1 の値、 10^{-3} 、 3×10^{-3} はそれぞれ昼間、夜間に対応すると考えてよい。 k_1 が大きくなれば下降点緯度は低緯度側へずれる、しかし最終波面法線方向は 180° から徐々ではあるがその差が増大し、両者は反対作用をもつ。前田・大家[5]によると鉛直方向に対し $\pm 2^\circ$ というきびしい条件を満足しなければ突き抜け不可能だと指摘されていることから今回観測された磁気緯度 20° 付近のホイッスラは南半球の最大電子密度領域での反射をうけているものと思われる。これは第11図中の 290 km 以上におけるホイッスラの高い密度も定性的には説明できる。また図には示さなかったが、290 km 以下で観測されたものは、条件よく最大電子密度領域を通過したもので、大部分はピュア型を示すが、300 km 以上ではピュア型とディフューズ型が大体半々程度であり、ディフューズ型は反射による効果が現われているかも知れない。また最大電子密度付近を詳しく調べた結果では、エコー型のもの受信されなかったことはダクト伝ばんでない可能性を暗示している。以上を要約すると、打ち上げ地点付近の空電が電離層を通過して南半球まで伝ばんするがそこで反射される。一般的にはトレーシングの際の波面法線が鉛直という初期条件は、地上の空電から発する場合には妥当である、しかし反射されるときには条件は異なるが同様な現象が期待でき、非ダクト伝ばんで磁気内を数回往復したものを観測したものと思われる。詳しくは[6]を参照されたい。

3. L-3H-3号機による観測結果

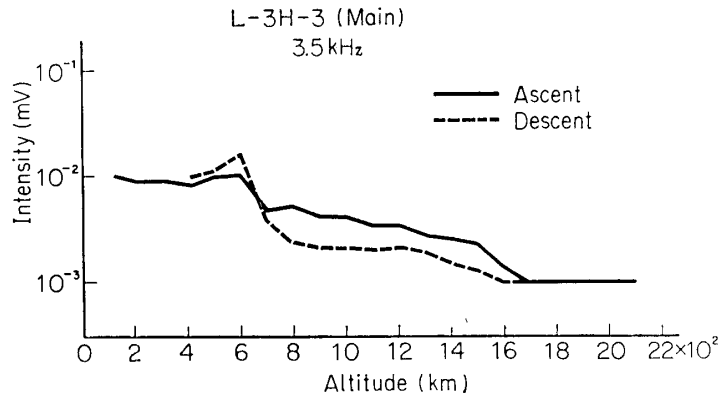
L-3H-3号機は1967年2月6日11:10 JSTに打ち上げられ、メインとブースタで同時にVLF帯電波観測を行ない、両方ともかなり良好な結果が得られた。観測結果の概況について述べると、受信強度は、一般に周波数が低いほど強く、メインの15 kHzでは最高数 μV に過ぎなかった。また高度に対しては、メイン、ブースタ共に、高度が増せば減少する。ブースタではこの減少はゆるやかで、メインでは600~800 kmの間において急激な減少が見られた。同一周波数で、メイン、ブースタ間の強度を比較すると、メインの方が数 db (7.5 kHz) から 50 db (0.5 kHz) 以上も強い。以上述べたことは、第14図 a, b および第15図 a, b から知ることができる。図の左側縦軸は、プレアンプの入力レベルを示し、



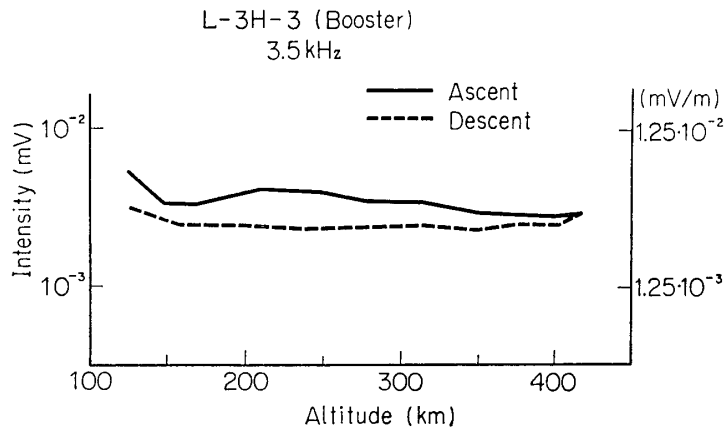
第 14 図 (a) L-3H-3 号機メインの雑音レベルの高度に対する変化 (0.5 kHz)



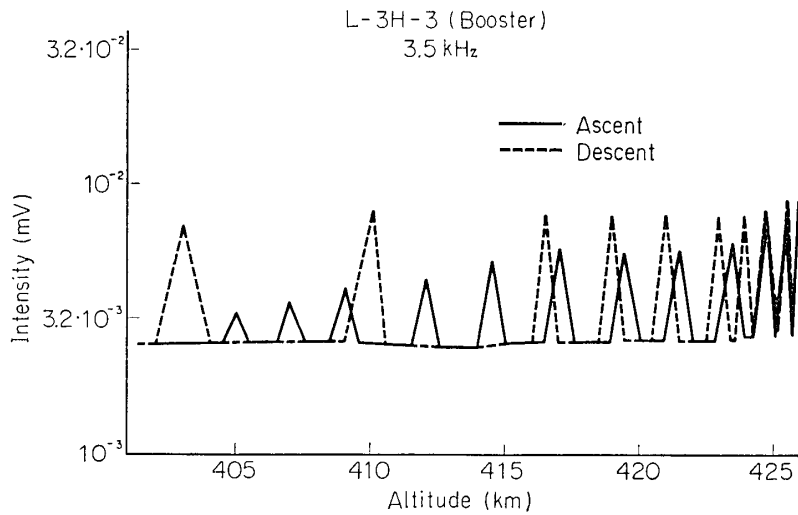
第 14 図 (b) L-3H-3 号機ブースタの雑音レベルの高度に対する変化 (0.5 kHz)



第 15 図(a) メイン・ロケットの雑音レベルの高度に対する変化 (3.5 kHz)



第 15 図(b) ブースタ・ロケットの雑音レベルの高度に対する変化 (3.5 kHz)



第 16 図 L-3H-3 号機ブースタの高度 410 km 前後で観測されたプリセッション変調をうけた雑音電波のレベル変化 (3.5 kHz)

右側はこの値からの換算電界強度を示している。アンテナ出力インピーダンス (数十k Ω) に比し、入力インピーダンス (100k Ω 以上) が大きいので、高度に伴うアンテナ出力インピーダンスの変化を無視し、アンテナの 1/2 長をアンテナ実効高として計算したものであるが、電界強度の数値は、かなり大きな誤差を含んでいる。ブースタの 3.5kHz は、記録紙上の飽和レベルが明瞭でなく、小さめに値が出ているおそれがある。ここで本観測の結果と、L-3-2 号機で観測されたイオン静電波 [3] についての特性との比較を行なってみる。第 16 図はブースタの 3.5kHz の高度 415km 付近における、プリセッション変調によるレベルの変化を示したものである。このようなレベル変化は、スピン周期に一致するものが卓越していたが、1/2 周期のものも見られる場合があった。どうやらスピン周期のレベル変化は動かしがたい事実のように思われる。次にアンテナと磁場方向と、強度との関係について述べる。メインとブースタのプリセッション角は、姿勢計の結果から、それぞれ 24°~42° (最大値と最小値を示す) と 24°~46° の変化をしたことがわかる。1 プリセッションでのこの角の変化は、メインでは $\pm 2.5^\circ$ 以内、ブースタでは $\pm 10^\circ$ 以内である。プリセッション角の最大値から、水平アンテナが地球磁場にもっとも近づいたときの角度は、メインでは 48°、ブースタでは 44° であったことがわかる。これによって、L-3H-3 号機による観測では、水平アンテナは磁力線に平行となることがなかったばかりか、一番近づいたときでさえ 40° 以上離れていたことが明らかとなった。これは L-3-2 号機でアンテナが地球磁場方向を向いたとき、静電波を観測できるであろうという仮定とは異なっている。次にアンテナが磁場に直交する場合について調べる。水平アンテナは一般に 1 スピンの間には、必ず 2 回地球磁場に直交するが、この位置は、磁気姿勢計の水平成分が 0 レベルを示す時間、アンテナと姿勢計の軸とのなす角およびスピン周波数で知ることができる。第 18 図の下降時 420km 付近を調べた結果では、アンテナが磁場に直交する位置は、周期変化の山にも谷にも対応しないことがわかった。またメインとブースタ、あるいは他の観測ロケットを加えても同様であるが、観測された強度差が大きいことは、静電波として考えていたものが、自然に存在しているものではなく、ロケットのスピードと関係があることを暗示しているように思われる。以上の結果を総合すると、地球磁場の方向に対する依存性は、平行でも垂直でもないこと、スピンドごとに信号をピックアップすることが、かなり明らかにされたといえる。また、ロケットのスピードと強度との間に関係がありそうで、ロケットの飛しょうにとまなうじょう乱が、周期性雑音の発生に関与しているかも知れない。現在 L-3-2, L-3H-3 号機の詳しい再検討を始めたところで、上述した飛しょう体周辺の平衡状態での電子密度分布に表われる航跡効果 (wake effect) や、この平衡状態に重畳される摂動効果としての衝撃波の存在の確認を行ないたい。この衝撃波はイオン音波の原因となると考えられ重要である。これらじょう乱波の検討とともに、今後自然に存在する静電波動の性質も明らかにしたい。

4. あ と が き

以上の議論からホイッスラの電離層突き抜けの理論的研究、また飛しょう体によるじょう乱波の問題は今後究明されるべきである。一方従来までの受動的実験から前進して筆者らが

K-9M-29号機で計画しているような親子ロケット方式を用いたホイッスラ伝ぱん実験というような能動的実験の方向に進む必要がある。さらに積極的に不安定性を励起して諸現象の性質を調べることも興味深い。

1969年12月20日

参考文献

- [1] Gurnett D. A., Shawhan S. D., Brice N. M. and Smith R. L.: Ion Cyclotron Whistlers, *J. G. R.*, **70**, p. 1655, 1965.
- [2] Scarf F. L., Crook G. M. and Fredicks R. W.: Preliminary Report on Detection of Electrostatic Ion Waves in the Magnetosphere, *J. G. R.*, **70**, p. 3045, 1965.
- [3] Iwai A., Otsu J. and Tanaka Y.: The Observation of ELF-VLF Radio Noise with Sounding Rockets L-3-2, K-9M-6, *Proc. Res. Inst. Atmospheric, Nagoya Univ.*, **13**, p. 1, 1966.
- [4] Hayakawa M.: Propagation of Whistler Modes in an Inhomogeneous Plasma, *J. Phys. Soc. Japan*, **27**, 1969 (in press).
- [5] Maeda K, and Oya H.: Penetration of VLF Radio Waves through the Ionosphere, *J. Geomag. Geoelect.*, **14**, p. 151, 1963.
- [6] Hayakawa M., Ohtsu J. and Iwai A.: Rocket Observation of Very Low Frequency Radio Waves in the Ionosphere, *Rep. Ionos. Space Res. Japan* (in press).