

Doppler 法による電離層中の VLF 電波の 伝搬ベクトル方向の測定*

木村 磐根**・平石 謙治†・富本 哲雄**

Measurement of wave normal directions of VLF waves propagated through
the ionosphere by means of the VLF Doppler technique

By

Iwane KIMURA, Kenji HIRAISHI and Tetsuo TOMIMOTO

Abstract: Wave normal directions of VLF signals propagating through the ionosphere can be determined by measuring Doppler frequency shift of the signals by means of rocket borne receivers. Two rockets were launched to detect the NWC signal of 22.3 kHz which was transmitted from Australia and propagated on two completely different paths, one being propagated through the earth-ionosphere wave guide and up to the rocket, the other propagated down to the rocket by the whistler mode directly from the source in the opposite hemisphere. The wave normal directions of the latter mode were almost vertically downward in the ionosphere in the northern hemisphere, although substantial error was involved in the determination of the wave normal direction for a part of the upgoing flight of the rockets, due to the relative geometry of the directions of the rocket flights and the geomagnetic field.

1. 緒 言

ロケット実験による VLF ドップラ観測はこれまで数回行なわれ、電子密度プロファイルの観測法として簡単で精度が高い方法であることが確認されてきた。一方この方法はドップラシフトのデータ処理にソナグラフを用いると、そのソナグラムから電波の伝搬特性（たとえば偏波、伝搬ベクトル方向）の情報が得られることが明らかとなった [1][2]。

そこで南半球オーストラリア北西岬から出されている 22.3 kHz の信号 NWC（送信電力 1 MW）が地表波（導波管モード）で伝わってきた強度が内之浦付近で約 2 mV/m 程度もあることに着目し、この電波をロケットで受信すれば地表波が電離層を突き抜けて下からロケットに達するモードと、南半球の源から直接ホイストラモードによって磁気圏を伝搬し上から

* 宇宙研特別事業費による論文

** 京大・工学部

† 日本電気(株)

ロケットに達するモードが同時にロケットで受信され、それが先のソナグラムのうえで分離して現われるものと予想された。そこで 1970 年 1 月 27 日夜 K-9 M-29 号機によって NWC 局のドップラ実験が行なわれたが、予想通りロケットでは両者が同時に受信されソナグラムのうえでも明瞭に判別できることがわかった [3]。

この結果の再確認のため、1971 年 1 月 23 日夜前記と同様な実験を行ない満足な結果が得られた。本報告では得られたドップラシフトから電波の伝搬ベクトルを定める方法の原理を簡単に述べてから、K-9 M-35 号機による実験およびその結果について述べ、特に NWC 信号ホイストラモード波の伝搬ベクトル方向については K-9 M-29, 35 号両機の結果をまとめて報告する。

2. 伝搬ベクトル方法決定法

地上からの信号とロケットで受信したときのドップラシフト Δf は、媒質のパラメータの時間的変動を無視すれば次式で与えられる [4]。

$$\Delta f = -\frac{f}{c} \mu V \cos \sigma \quad (1)$$

ここで f は電波の周波数、 c は光速、 μ は屈折率、 V はロケットの速さ、 σ は伝搬ベクトル \mathbf{K} とロケット速度ベクトルとのなす角である。ドップラシフトの負符号はロケットが電波源から遠ざかる場合 Δf が負となることを表わす。

今ロケット軌道面を x - z 面に選び (z は垂直上方)、 \mathbf{K} ベクトルの z 軸正方向とのなす角 (電離層を地表に平行な平面と仮定すると入射角) を ρ 、また \mathbf{K} ベクトルを水平面へ投影した方向と x 正方向とのなす角を β とするとき (1) 式は次のように書ける。

$$\Delta f = -\frac{f}{c} \mu (V_x \sin \rho \cos \beta + V_z \cos \rho) \quad (2)$$

ただし V_x, V_z は V の x, z 方向成分である。また屈折率はアプルトン・ハートルの式 (以下 A-H 式と略記) によって与えられ、電子のプラズマ周波数 f_p 、サイクロトロン周波数 f_H 、および \mathbf{K} ベクトルと外部磁場 \mathbf{B}_0 のなす角 θ の関数である。この θ は \mathbf{B}_0 と z 軸とのなす角 ϕ 、 \mathbf{K} ベクトルの水平成分が地磁気子午面となす角を δ とすると

$$\cos \theta = \sin \rho \cos \delta \sin \phi + \cos \rho \cos \phi \quad (3)$$

で与えられる。

これらの式と観測されたドップラシフト Δf とにより \mathbf{K} ベクトルの方向 ρ を定めるわけであるが、緒言で述べたように“地表波→電離層通過→下からロケット”のモードと、“ホイストラモード→上からロケット”のモードの二つの場合があるので以下これを分けて考える。

i) 電離層下部入射で下からロケットに達する場合

今地上局からの信号が電離層の下から入射してロケットに達する場合には、その初期入射角を ρ_0 とすると、スネルの法則

$$\mu \sin \rho = \sin \rho_0 \quad (4)$$

を用いて、(2) 式は

$$\Delta f = -\frac{f}{c}(V_x \cos \beta \sin \rho_0 + V_z \sqrt{\mu^2 - \sin^2 \rho_0}) \quad (5)$$

と書き換えられる。電波の伝搬ベクトル \mathbf{K} は平面層状電離層中では常に初期入射面内に含まれるから、 β は初期入射方向により決定され一定、 V_x, V_z はロケットの軌道から求められるから、 ρ_0 がわかっているならばロケットで観測された Δf から一意的に μ が決定される。またこの μ と (4) 式とから \mathbf{K} ベクトル方向 ρ が決定できる。またこの ρ を使い (3) 式から θ を知れば ((3) 式中 δ も前述の β 同様平面層状電離層中では一定で初期の δ に等しい)、 μ と θ からプラズマ周波数 f_p あるいは電子密度 N_e が求められる。この際サイクロトロン周波数、地球磁界の方向は、ロケットの位置を与えればかなり正確に計算することができる (地球磁場を球関数で展開し、高次の項までとったものを用いる)。

II) ホイスラモードで上からロケットに達する場合

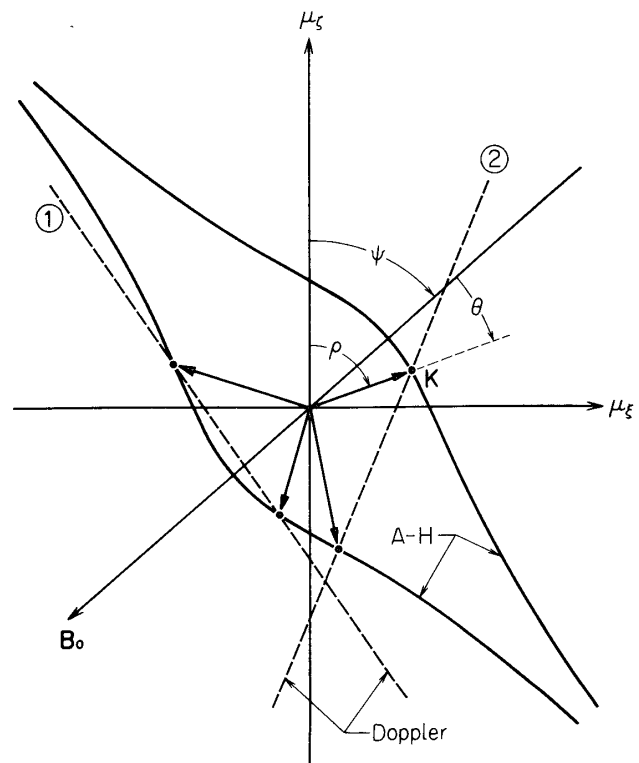
この場合には電波源が反対半球側にあり、その源付近の電離層では伝搬ベクトル \mathbf{K} はほぼラジアル方向を向き、以後磁力線の彎曲に従ってその方に曲げられ、結局以後伝搬中 \mathbf{K} は地磁気子午面内に常に含まれることがわかる [5]。したがって、この伝搬に対して (3) 式中の δ は 0° または 180° となり、また (2) 式中の β はロケット軌道面と地磁気子午面のなす角で既知ということになる。

そこでこの伝搬に対するドップラシフト Δf が測定できたとすると、 $\mu \cos \rho = \mu_\xi$ 、 $\mu \sin \rho = \mu_\eta$ と書いて (2) を変形し

$$\mu_\eta = -\cos \beta \frac{V_x}{V_z} \mu_\xi - \frac{\Delta f}{f} \frac{c}{V_z} \quad (6)$$

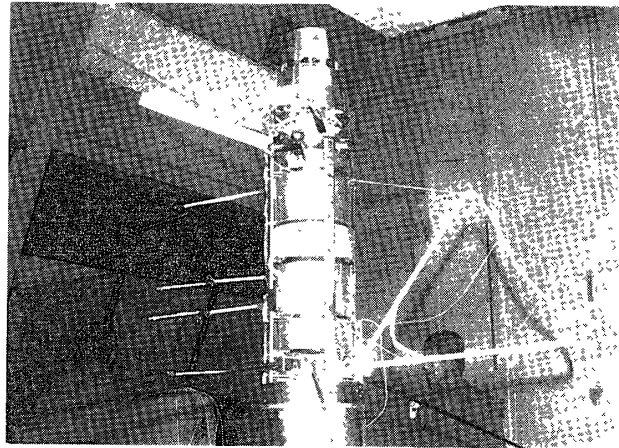
を得るから、与えられた $\Delta f, \beta, V_x, V_z$ に対して μ_ξ と μ_η の関係は直線で表わされる。

一方下からやってきた電波のドップラシフトからプラズマ周波数 f_p が知られるとすれば、 θ は (3) において $\delta = 0^\circ$ (または 180°) とすることにより、 $\theta = \rho - \psi$ (または $\theta = \rho + \psi$) となるから、屈折率 μ をアップルトン・ハートレの式により ρ の関数として計算することができる。特に $f < 0.5f_H$ のホイスラモードに対しては第1図の実線の曲線で表わされるようになり、 B_0 方向とそれに直角な方向について対称となる。ここで縦軸は磁気子午面内ラジアル方向であり、この方向に μ_ξ をとるとそれに直角でかつ磁気子午面内に



第1図 アップルトン・ハートレ (A-H) 式から求めた屈折率曲線 (実線) とドップラシフトから定まる屈折率直線 (破線)

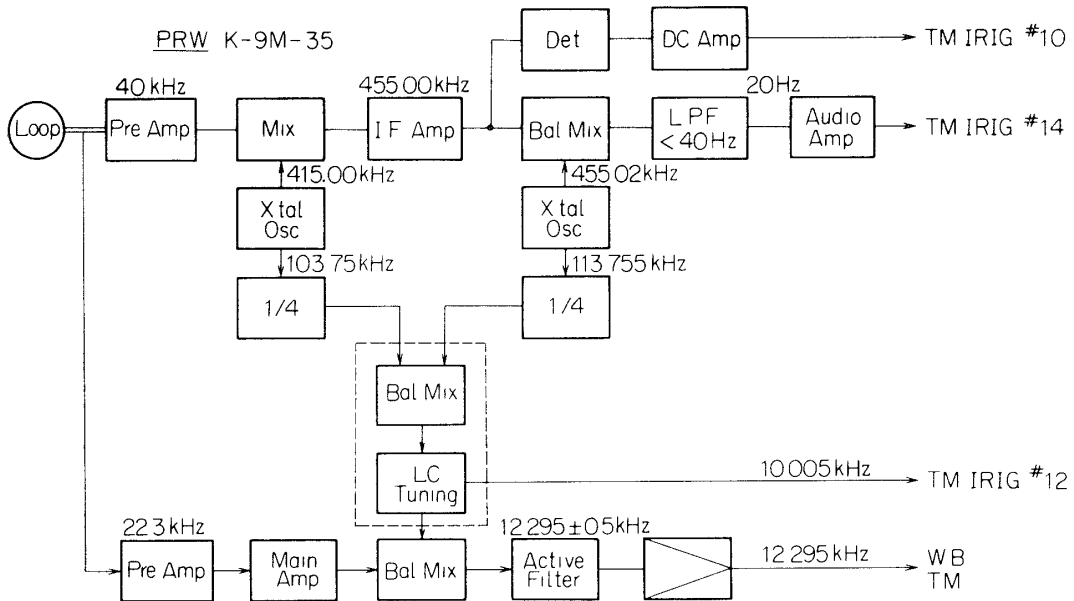
μ_{ξ} 軸かくる。この μ_{ξ}, μ_{ζ} と (6) 式のそれらとは同じものでなければならないから、第 1 図の μ_{ξ}, μ_{ζ} 面上に (6) 式の直線 (第 1 図で破線) を描き両者の交点を求めればそれが \mathbf{K} の方向 ρ を与えることになる。この操作は (6) 式と A-H の式を連立に解くことであり、実際には電子計算機によって求められる。この解は一般に 0~4 個あるか (交点が 0~4 個)、簡単な吟味により不適当なものが除かれる。このようにしてロケットへ上からやってくる VLF 電波の \mathbf{K} ベクトルの方向が決定できる。



第 2 図 K-9 M-35 開頭状態

3. 実験装置

K-9 M-29 号機の実験についてはすでに報告したから [3], ここでは K-9 M-35 号機の実験装置について述べる。第 2 図はこのロケット開頭時のアンテナ展開の様子を示している。この写真に示される三角形のループアンテナ (面積 0.092 m², 20 回巻) は第 3 図のブロック図に示されるように、受信した 40 kHz (JG 2 AS, 千葉県検見川) と 22.3 kHz (NWC) に共用した。ループ面はアンテナ軸を含む面内にあり、ロケットが右回り約 1.7 サイクルのスピンをしたから、電波か地球磁場正方向に関して右回り (または左回り) すれば、受信周波数



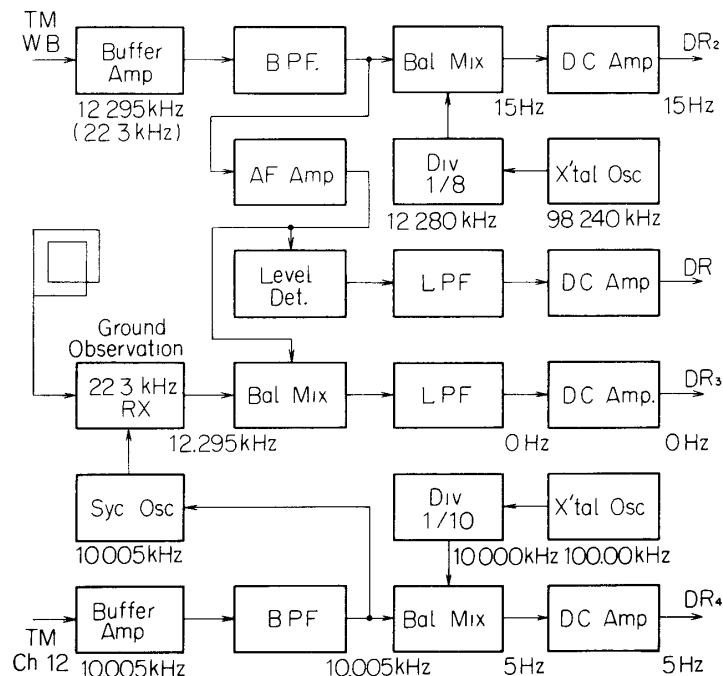
第 3 図 K-9 M-35 ロケット搭載装置ブロック図

はスピン周波数だけ上る（または下る）ことになる。

40 kHz 側はロケット搭載の2個の水晶により 20 Hz にビートダウンして地上へテレメータし (IRIG # 14), またその水晶発振器のドリフトを検出するために, その両発振器の差の1/4, すなわち 10.005 kHz を地上へテレメータした (IRIG # 12). また 40 kHz 振幅の情報は IRIG # 10 により伝送した。

一方 22.3 kHz は上記 10.005 kHz をローカルとして 12.295 kHz にビートダウンし, 広帯域テレメータ (W. B. TM) の一部に載せて伝送した。

地上では 40 kHz のビート 20 Hz はそのままデータレコーダ (TEAC R-400) チャンネル 1-DR₁ に記録, 22.3 kHz 信号については第4図のブロック図に示されるように, 12.295 kHz から地上の安定な水晶により 15 Hz にビートダウンし, DR₂ に記録され, また地上で



第4図 地上リアルタイムデータ処理装置ブロック図

観測した 22.3 kHz 信号とロケットから送られてきた 10.005 kHz 信号に同期したローカルにより 12.295 kHz を作り, ロケットから送られてきた 12.295 kHz とビートをとることにより, ロケット内水晶のドリフト分を常に補正して真のドップラシフト プラス スピン周波数の情報が得られ, それを DR₃ に記録した. また 10.005 kHz 信号は地上の安定な水晶により 5 Hz にビートダウンし, これを DR₄ に記録してドリフトモニタとした. なおこの DR₄ には同時に安定な 25 Hz を 20 秒ごとにオンオフしたものを重畳させ, タイムマークとあとの周波数分析時の周波数マーカとした。

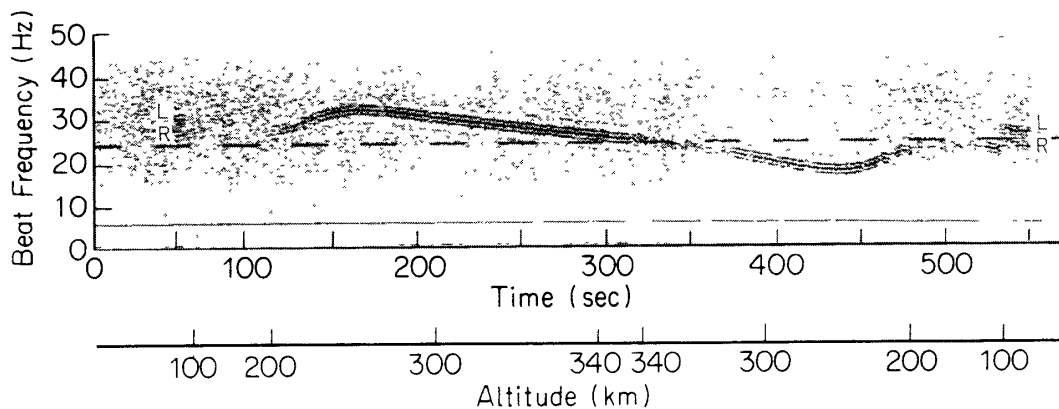
4. 実験結果

4.1 電子密度

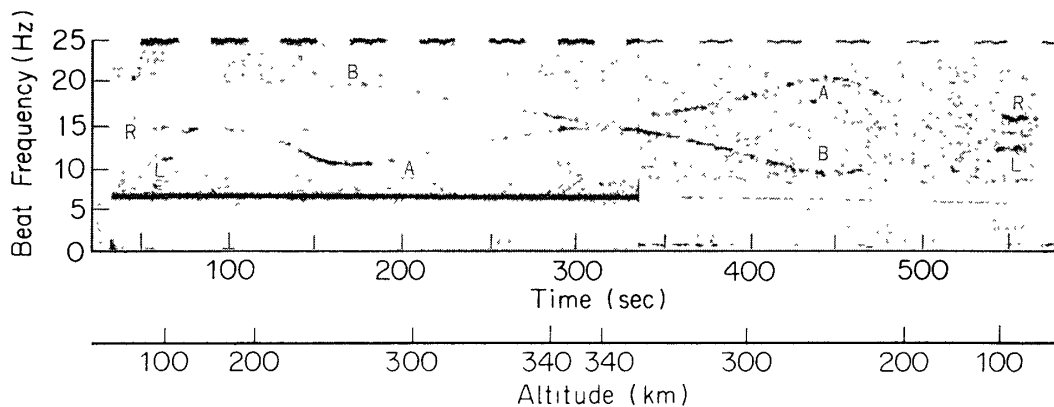
K-9 M-35 号機は 1971 年 1 月 23 日 2020 JST に打上げられ約 10 分間飛しょうし、最高々度 340 km に達した。ロケットは南々東（地理南から 35° 東）の方向に水平距離で約 420 km 飛しょうした。

地上で DR に記録された信号は 0~20 Hz 程度であるから、再生時にデータレコーダ 2 台を用いて周波数を 160 倍にあけてソナグラフにより周波数分析した。第 5, 6 図は JG 2 AS (40.0 kHz) 信号および NWC (22.3 kHz) 信号のドップラビートのソナグラムである。両ソナグラムから飛しょう中のドップラシフトの時間的変化が明瞭にわかる。両図中高さ 100 km 以下で R, L の記号は右回りおよび左回り偏波の共存を示し、この 2 モード間はロケットのスピン周波数 1.72 Hz の 2 倍だけ周波数がずれている。100 km 以上ではすべて右回りモードある。

第 5 図でビートが 3 本の線からなっているのは、信号が 0.5 秒のマーク、0.5 秒のスペー



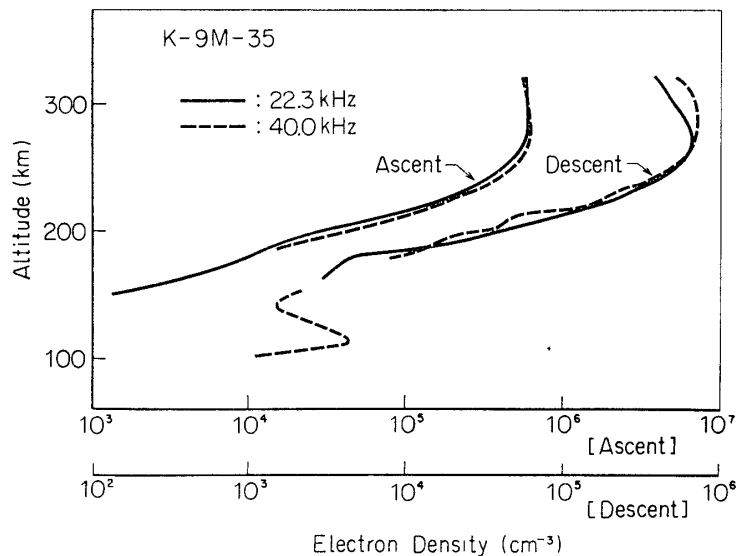
第 5 図 JG 2 AS (40.0 kHz) 信号のドップラビートのソナグラム (K-9 M-35)



第 6 図 NWC (22.3 kHz) 信号のドップラビートのソナグラム (K-9 M-35)

スの矩形波からなっているからで、基本波の両側に 1 Hz の側帯波がでているのである。第 6 図では A, B 二つのサインカーブが見られるが、 A は緒言で述べた地表波→電離層→下からロケットへと伝搬したもの (A モードと名付ける) で、 B は南半球からホイスラーモードで上からロケットに達したもの (B モードと名付ける) に対応していることが容易に了解できる。

まずこれらのソナグラムから正味のドップラシフトを読み取り (第 6 図では A モード)、前節で述べたプロセスによって電子密度を求めると第 7 図のごとくなる。この結果から、源の位置や周波数が大幅に異なっても、下からロケットに達する電波のドップラシフトを測れば電子密度はかなり一致したプロファイルが得られることがわかる。なおこの場合、電離層下部への入射角 ρ_0 は送信点がいずれも十分遠方にある (JG 2 AS で約 1,000 km, NWC で約 6,000 km) ので grazing 入射と考え 85° をとったが、この仮定に基づく誤差は僅少である。

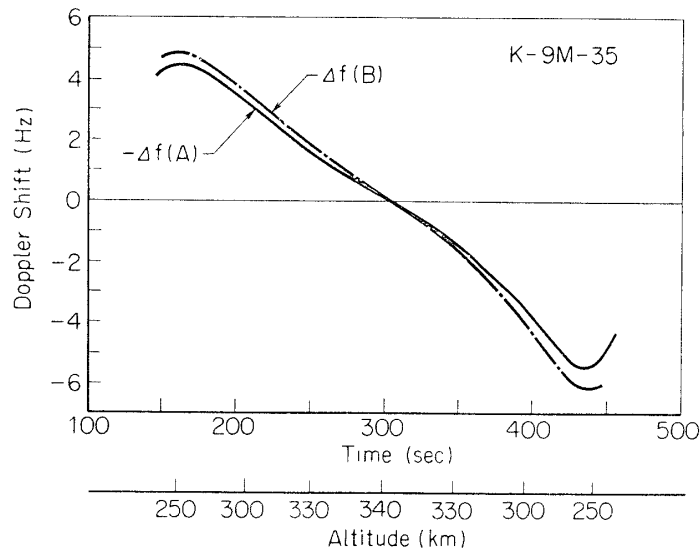


第 7 図 VLF ドップラ実験で得られた電子密度分布

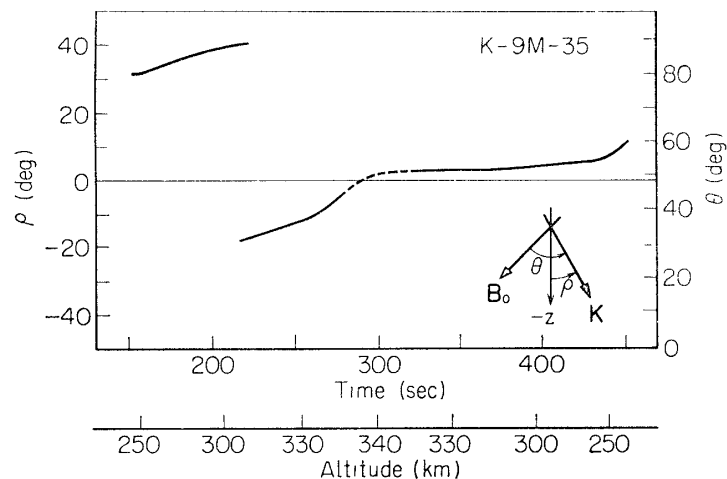
4.2 伝搬ベクトル

下からロケットに達するモードについては、両信号共地上 100 km 以上では μ が 1 より十分大きくなるので、スネルの法則により、 \mathbf{K} ベクトルはほぼ垂直上向きになることは明らかである。

次に NWC 信号の B モードについてであるが、このモードのドップラシフトを A モードのそれと比べると第 8 図のようになり、その極性は逆で大きさはほぼ等しいが B モードが A より若干大きいことがわかる (ただしその差は 10% 以内)。このことから前述の A モードの \mathbf{K} ベクトルがほぼ垂直上方であることを考慮すると、第 1 近似では B モードの \mathbf{K} ベクトルはほぼ垂直下向きであるといえる。しかし若干 Δf に差があるので第 2 節に述べた方法で B モードの \mathbf{K} ベクトルの方向を計算してみると第 9 図のようになる。これからロケットの



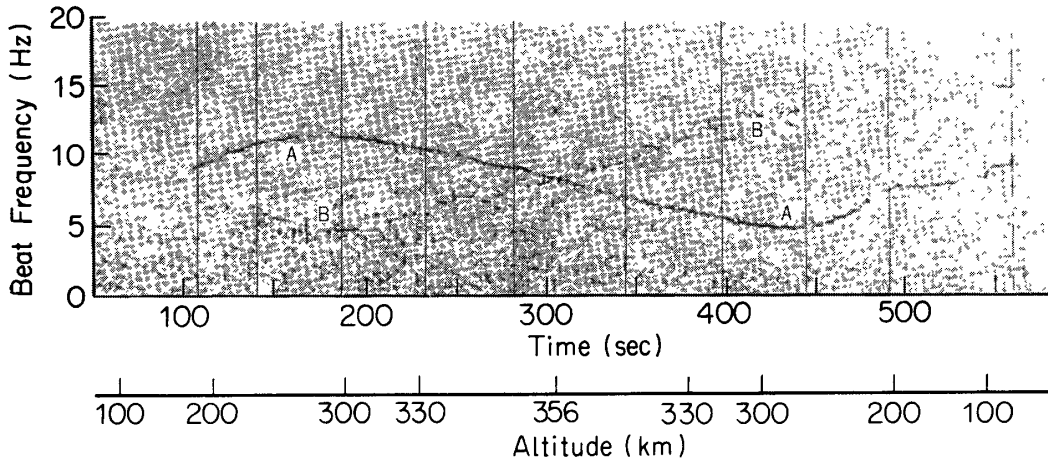
第 8 図 NWC 信号 A, B モードのドップラシフト

第 9 図 NWC 信号 B モードの伝搬ベクトル \mathbf{K} の方向 (K-9M-35)

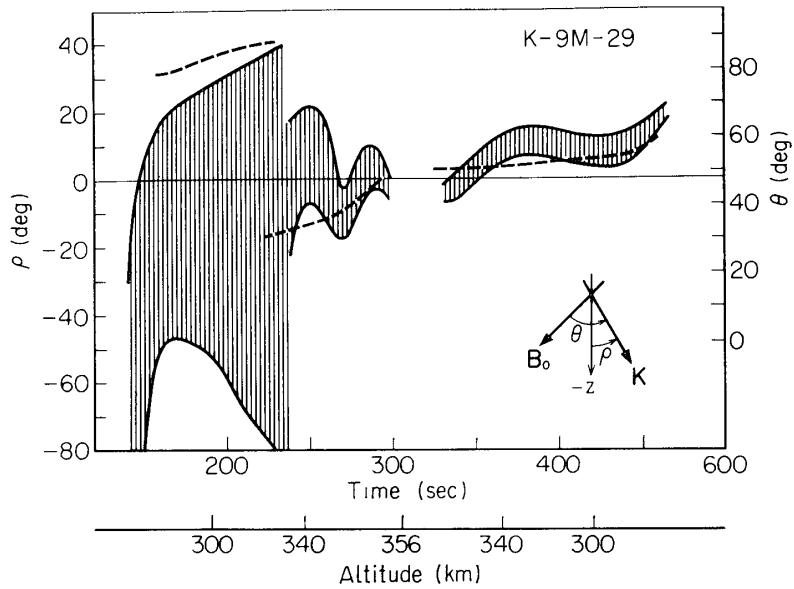
下降時には \mathbf{K} ベクトルは垂直下方から若干南寄りでその角度は 10° 以内となり先の第 1 近似の結論と一致するが上昇時には垂直下方より大きくずれているところがあり、特に発射後 210 秒近くで不連続的に変化している。しかし第 8 図では $\Delta f(B)$ に不連続的な変化がないところから考えてこの不連続はリアルなものかどうか疑問になる。

一方 K-9M-29 号機 (1970 年 1 月 27 日 1920 JST 打上げ) のドップラビートを示すと第 10 図のようになり [3], これから第 2 節の方法で \mathbf{K} ベクトル方向を計算すると第 11 図のようになる*。第 10 図から明らかのようにこの場合の B モードは第 6 図の K-9M-35 の場合よりもビートの幅がひろがっている。これは入射電波 (B モード) の \mathbf{K} ベクトル方向に

* 文献 [3] 中第 10 図の \mathbf{K} ベクトル方向には計算の誤りがあった。本報告の第 11 図が正しい結果である。



第 10 図 K-9 M-29 で得られた NWC 信号のドップラビートのソナグラム



第 11 図 K-9 M-29 データから計算された NWC 信号 B モードの伝搬ベクトル \mathbf{K} の方向 (破線は K-9 M-35 の結果をロケットの apex で合せたもの)

ひろがりがあることを示している．そこで第 11 図の \mathbf{K} ベクトルの方向も幅をもたして描いてある．第 11 図中破線で示したのは K-9 M-35 の第 9 図のカーブをロケットのアペックスを合せて描いたものであるが，ロケット下降時の \mathbf{K} ベクトル方向，および上昇時の \mathbf{K} ベクトルの垂直下方からの大きはずれ，また不連続的な方向の変化の傾向が非常によく一致することがわかる．この両実験は季節は同じで F_2 層の電子密度プロファイルも非常によく似てはいるが ([3] 参照)，1 年のずれもあり，上記の傾向の一致は良すぎるようにも思われる．ところが次節に示すようにこれは偶然ではなく，ロケットの打上げ方向が同じなら同じ傾向がでることが明らかになった．

5. 検 討

いま (6) 式をながめてみると, NWC 信号の B モードについて $\cos \beta > 0$, Δf はロケット上昇時負, 下降時正值となる. またロケット速度 V_x は常に正であるが V_z は上昇時正, 下降時負となるから (6) を

$$\mu_{\xi} = a\mu_{\xi} + b \quad (7)$$

と書きなおしたときのこの直線のこう配 $a \equiv -\cos \beta V_x/V_z$ および μ_{ξ} 切片 $b \equiv -(\Delta f/f)(c/V_z)$ はロケット上昇時, 下降時につき第 1 表のようになる. これと第 1 図のグラフを合わせて考えると (第 1 図は北半球 dip 40~45° の内之浦付近を模擬しており μ_{ξ} 軸は磁南を向くものとする), ロケット下降時には (7) 式は第 1 図中②で示したような破線の直線とな

第 1 表

ロケットの状態	V_x	V_z	Δf	a	b	第 1 図中の直線
上 昇 時	+	+	+	-	-	①
下 降 時	+	-	-	+	-	②

り A-H 式のカーブとの交点は正確に定まる. つまり \mathbf{K} ベクトル決定の誤差が小さいことになる. 一方上昇時には (7) 式は同図中①に示した傾向の破線の直線になり, A-H 式のカーブと傾向として平行となるので a, b の値によっては交点がきまらなかったり, $\Delta f, V_x, V_z$ のわずかの誤差で交点の位置は大幅にずれたりする. また上昇中 a, b の値は連続的に変化して行くから, どこかで交点の位置が不連続的に変わることも了解できる.

以上の検討から明らかになったように上昇時の \mathbf{K} ベクトル決定の大きな誤差はロケットの飛しょう方向と地球磁場の向きの相対関係によって必然的に現われるものであって, そのような現象はもしロケットを北寄りに打上げた場合には $\cos \beta < 0$ となって今度は下降時に同様なことが起こることになる. もち論ドップラシフト Δf や, V_x, V_z を正確に定められれば理論的には交点は正確に決定できるはずであるが, これらの量にはそれぞれ数パーセント以下の誤差は避けられないので, ある程度のあいまいさが残る. これらのことを合わせて考えると NWC-B モードの \mathbf{K} ベクトルは Δf の傾向から第 1 近似でだしたようにほぼ垂直下向き (厳密には若干南向き) であると結論できる.

この結果は南半球の電波源からホイストラモードで北半球までやってくるとして ray tracing を行なうと得られる. ただし電子密度の赤道異常を考慮する必要がある. また, 当初予想されたダクトの存在であるが, 実験で得られた結果たとえば上記の \mathbf{K} ベクトルの方向の傾向, B モードの強度の空間的, 時間的変動幅が小さいことなどから考えるとダクトの存在は必ずしも必要ではないといえる.

6. む す び

VLF ドップラ実験は最初電子密度の測定の目的で行なわれたものであったが, それが発

展して電波伝搬の基本的特性のチェックや、本報告でのべたように南半球の源からのホイストラモード信号の伝搬ベクトルの情報等々数々の興味ある結果が得られた。ホイストラモード波の伝搬ベクトルについてはほぼ垂直下方を向くことがわかったが、厳密な計算をすると現在の打上げ方向の場合には上昇時に大きな誤差がでることもあきらかになった。

7. 謝 辞

この実験は打上げ主任大林辰蔵教授をはじめ東大宇宙航空研究所の方々のご協力によってできたことをまず記し厚く感謝する次第である。

40 kHz 標準電波の発射については郵政省電波研究所佐分利義和氏、および防衛庁の方々の御協力を得た。ロケット搭載装置は明星電気(株)の製作になるが、特に瓜本、阿部両氏そのほかに負うところが大きい。ここにあわせて感謝する次第である。

なお筆者らが平素から御指導を頂いている前田憲一教授に深く謝意を表するとともに、この実験に協力して下さった当研究室の松本 紘、松尾敏郎両氏、また地上データ処理装置製作に協力された徳弘仁志君、その他研究室の方々に感謝の意を表する。

1972年1月14日

参 考 文 献

- [1] Kimura, I.: VLF Doppler Experiment for Observation of the Ionosphere by means of Rocket, Rep. Ionos. Space Res. Japan, Vol. 21, 173, 1967.
- [2] 木村磐根: 電離層プラズマ中の VLF 電波伝搬モードのロケットによる直接観測, 昭和45年度, 電子通信学会, 全国大会, S4-9.
- [3] 木村磐根, 平石謙治: K-9 M-29号機による VLF ドップラー観測, 宇宙研報告, 第7巻, 95, 1971.
- [4] Kimura, I. & R. Nishina: Doppler Shift in an Inhomogeneous Anisotropic Medium, Rep. Ionos. Space. Res. Japan, Vol. 21, 187, 1967.
- [5] Kimura, I.: Effects of Ions on Whistler-mode Ray Tracing, Radio Sci., Vol. 1, 269, 1966.