

VLF ドップラー法における電離層の傾斜の効果*

木村 磐根**・富本 哲雄**

1. 緒 言

VLF ドップラー法による電離層観測の実験は、これまでたびたび行なわれたが、ドップラーシフトから電子密度を求める過程においては電離層は地表面に対し平行、すなわち水平電離層の仮定が用いられていた。しかし低緯度地帯では後述のように電離層臨界周波数が緯度が低くなるほど高いことから、電離層は常に若干の傾きを持っていると考えられる。

一方、たとえば K-9 M-38 号機のドップラー観測から得られた電子密度をみると、ロケット軌道の頂点付近でソナグラム上でのドップラービート読み取り誤差の十分小さい高さ 320 km~340 km 付近では、ロケットの上昇時、下降時の電子密度に約 20% の相違がある。このとき両軌道（上昇、下降）の水平距離はわずか数 10 km であることを考えると、本来この両点の密度はほぼ一致すべきものと考えられる。そこでこの相違が電離層の傾きの影響ではないかと考えその効果を見積もって見た。電離層の傾斜は赤道異常などのモデルを想定すると必ずしも電離層が一様に一方向に傾いているとはいえないが、以下では簡単のために層全体が一定の傾斜をしているとして議論を進める。

2. 電離層の傾きの効果

速度 V で進行するロケットが周波数 f の VLF 信号を受信した場合、その信号のドップラーシフト周波数 Δf は次式で表わされる。

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

ここで μ : 屈折率

σ : 電波の k ベクトルとロケットの速度 V のなす角

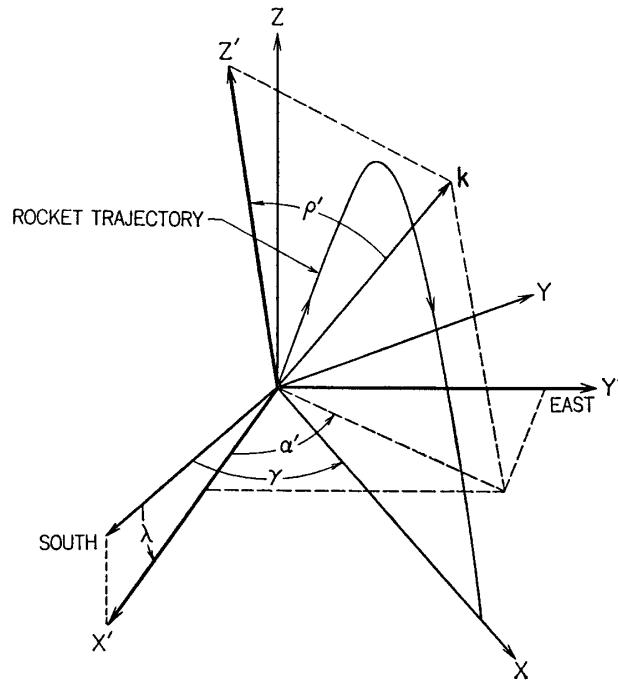
(1) 式における σ は、 μ を含む既知の量で書き表わすことができ、したがって (1) 式より屈折率 μ を求めることができる。これとアップルトンハートルの式より μ を消去すればプラズマ周波数が得られる [1]。

電離層の傾きを考慮するには、(1) 式の $V \cos \sigma$ を、傾いた電離層上にとった座標系で表わせばよい。すなわち第 1 図のように座標軸を (X', Y', Z') にとれば、(1) 式は次式のように書ける。

$$\Delta f = -\frac{f}{c} \mu [\sin \rho' (V_{x'} \cos \alpha' + V_{y'} \sin \alpha') + V_{z'} \cos \rho'] \quad (2)$$

* 宇宙研特別事業費による論文

** 京都大学工学部

第1図 電離層が λ の傾きを持つ場合の座標軸

ここで ρ' : 伝播ベクトル \mathbf{k} と Z' 軸とのなす角
 α' : 伝播ベクトル \mathbf{k} の $X'-Y'$ 面への投影が X' 軸となす角
 $V_{X'}, V_{Y'}, V_{Z'}$: 速度 \mathbf{V} の X', Y', Z' 方向成分
 またスネルの法則は次式で表わされる.

$$\sin \rho' = \frac{1}{\mu} \sin \rho_0' \quad (3)$$

ここで ρ_0' : 傾いた電離層への電波の入射角
 (3) 式により, (2) 式中の $\sin \rho'$, $\cos \rho'$ などは電波の電離層への入射角 ρ_0' で表わすことができるから, 結局次式のように μ が求まる.

$$\mu^2 = \left[\left\{ -\frac{\Delta f}{f} c - \sin \rho_0' (V_{X'} \cos \alpha' + V_{Y'} \sin \alpha') \right\} / V_{Z'} \right]^2 + \sin^2 \rho_0' \quad (4)$$

(4) 式とアップルトンハートレの式より μ を消去すれば電子密度が得られる.

以下では電離層の傾斜の効果をもう少し定性的に検討してみる. 電子密度がきわめて小さい限り, VLF 電波の波面の方向はほとんど受信点での電離層の面ベクトル方向を向いていると考えてよい. このような仮定のもとではドップラーシフトを表わす (1) 式はほぼ次のように書いてよい.

$$\Delta f = -\frac{f}{c} \mu (V_x \sin \rho \cos \gamma + V_z \cos \rho) \quad (5)$$

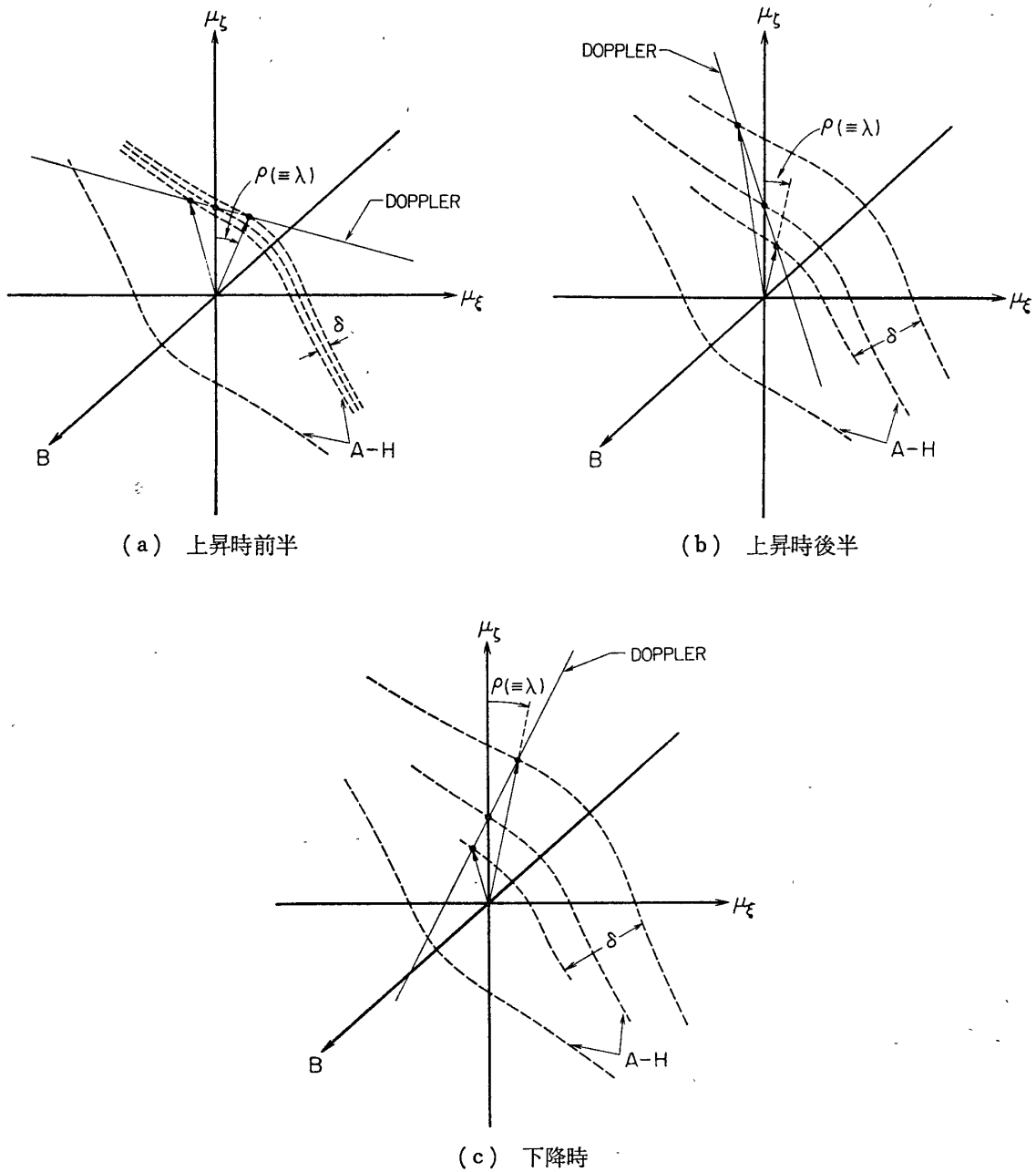
ここで ρ : 鉛直方向から測った \mathbf{k} ベクトルの方向で, 上記の仮定により電離層の傾斜角 λ に等しい.

γ : 南方向と, ロケット軌道の水平面投影がなす角 (K-9 M-38 の場合は 35°)

V_x, V_z : ロケット速度の X, Z 方向成分. ただし Z 軸は内之浦での鉛直上方, X 軸はロケットの打ち出し方向の水平面投影である. (図1参照)
 $\mu_\xi = \mu \sin \rho, \mu_\zeta = \mu \cos \rho$ とおいて (5) 式を書き直すと次式が得られる [2].

$$\mu_\zeta = a\mu_\xi + b \tag{6}$$

ここで,



第2図 アップルトンハートレ (A-H) 式から求めた屈折率曲線 (破線) とドップラースhiftから定まる屈折率直線 (細い実線). 太い実線は地球の磁場の方向

$$a = -\frac{V_x}{V_z} \cos \gamma, \quad b = -\frac{\Delta f \cdot c}{f \cdot V_z}$$

ロケットの上昇時と下降時について、(6)式の a と b の符号を吟味してみると表1のようになる。一方アップルトンハートレ曲線の形はロケット飛しょう中にはそれほど大きな変化はない。電子密度を求めるといことは、傾き λ (この場合 ρ)を決定することにより(6)式を表わす直線上の一点を指定してやり、その点を通るアップルトンハートレ曲線に対応する電子密度を決定することである。

表 1

	V_x	V_z	$\cos \gamma$	Δf	a	b
ASCENT	+	+	+	-	-	+
DESCENT	+	-	+	+	+	+

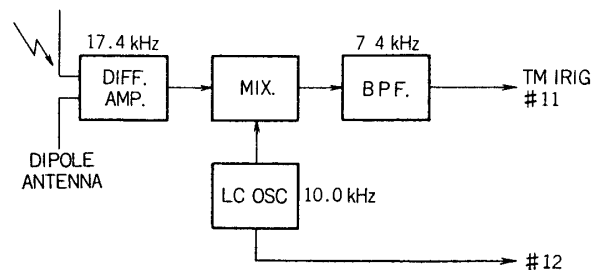
第2図の(a), (b), (c)は、それぞれ上昇時前半、上昇時後半、および下降時について上記の関係を図示したものである。これらの図より明らかなように、上昇時前半には λ は電子密度決定に大きな影響は与えず、かつ傾き λ と電子密度は正の相関を持つ。また上昇時後半には λ の影響が増大し、電子密度と負の相関を持つようになる。下降時には λ は電子密度と正の相関を持ち、上昇時より大きい影響を与えるものと考えられる。

3. K-9 M-38 号機実験

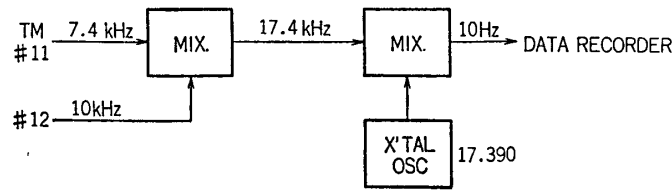
K-9 M-38号ロケットによるVLFドップラ観測は1972年2月22日15時JSTより約10分間行なわれ、ロケットは高度ほぼ350 kmに達した。観測に用いられた地上局信号は、愛知県刈谷市の依佐美局NDT(17.4 kHz-250 kW)である。ロケット搭載観測装置としては、第3図に示すように非常に簡単で10 kHzのローカル発振もLC発振回路により構成し、その周波数をもTMで地上に伝送する。地上では第4図の様に、IF信号7.4 kHzと10 kHzの混合により再び17.4 kHzにもどすので、LC発振の温度ドリフトがきかない。その後安定なXtal OSC(17,390 kHz)とのビートを取り、10 Hz近傍に落してData Recorderに記録される。ドップラビートの読みとりは、これまでのロケット実験[2]と同様ソナグラフを用いて行なった。

まず測定されたドップラビートから、電離層が水平であるとして電子密度のプロファイルを求めると第5図のカーブのようになる。

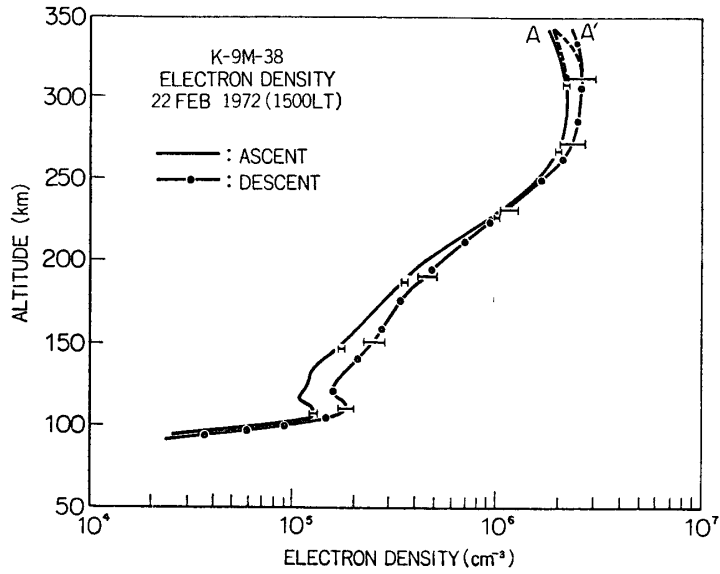
次に電離層の傾きの影響を定量的に調べるため、第5図に示した電子密度分布に対して、層を南方向に1°傾ける(換言すれば、観測点における k ベクトルの



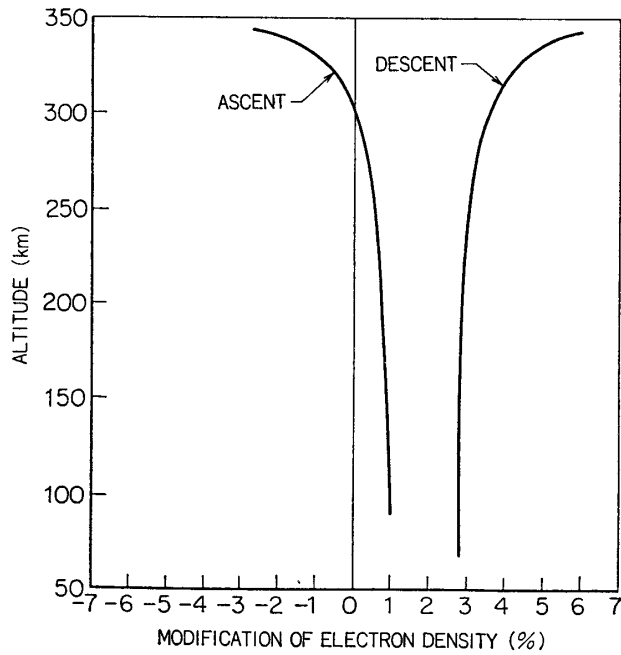
第3図 K-9 M-38 ロケット搭載装置ブロック図



第 4 図 地上リアルタイムデータ処理装置ブロック図



第 5 図 K-9 M-38 VLF ドップラー実験で得られた電子密度分布



第 6 図 電離層を南へ 1° 傾けた時の電子密度の変化 (%)

鉛直方向からのずれを南方向に 1° とする) ときの電子密度のずれを描いたものが第6図である。この図から明らかにロケット上昇時と下降時でその影響が異なり、下降時には上昇時の3倍以上のずれが現われるが、この傾向は2で定性的に明らかにされた通りである。

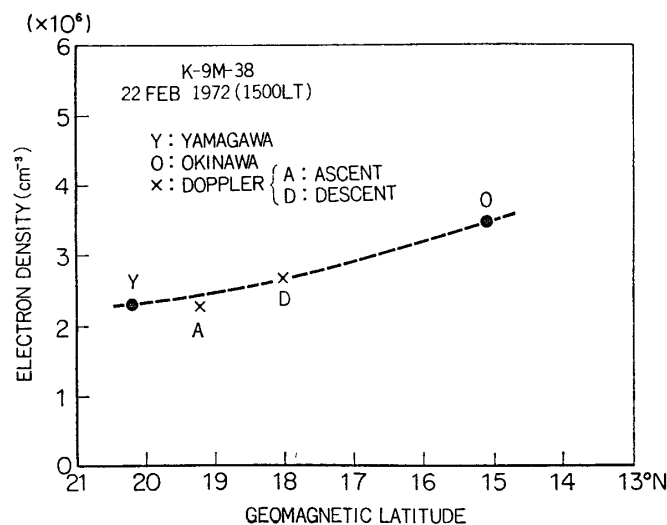
実際の電離層の傾斜角は $\pm 4^\circ$ 程度と考えられるので、この範囲の傾斜角の変化に対する電子密度の変化を第5図のカーブの上にエラーとして示した。

一方、第5図に示した A, A' 点 (これらの点ではソナグラムからドップラシフトの読みとりの誤差は2%程度である) では高度が同じで、水平距離が数10 km以内であるが、電子密度には約20%の相違がある。この差は電子密度の緯度的な相違によるものとは考えにくい。そこで前記の電離層の傾斜の効果を考えてみると、第5図からもし電離層の傾斜が -4° 程度であれば AA' 点の電子密度を一致させることも可能になる。

4. 検 討

電離層の傾斜は、本論文の取扱いでは平行層状のものが全体として傾いているとしており、いわゆる赤道異常のようなモデルには適格にはあてはまらない。厳密にはそのようなモデルで ray tracing を行ない、 k ベクトルがどこを向くかを調べる必要がある。しかし本取扱いでは各高さでの k ベクトルが、ほぼ layer normal (等電子密度面に立てた垂線) の方向を向くとしていることになるが、layer normal が高さによって変化するような実際のモデルでは k ベクトルと layer normal とは厳密には一致しない。その場合でも本取扱いで求められた第5図のエラーは k ベクトルの鉛直方向からのずれの角が $\pm 4^\circ$ に対する電子密度のずれの範囲を表わすものと考えれば、結果は一般的な本ドップラ方式の電子密度測定の誤差の程度を与えるものである。

一方ロケット観測当日、ほぼ実験時刻の山川、沖縄の電子密度の地上観測の結果は第7図に示すように緯度が低くなるとともに電子密度の上昇がみられる。この図にロケット観測から水平電離層の仮定のもとで得られた上昇時、下降時の最大電子密度を、観測点の水平位置



第7図 ドップラー観測と地上観測との比較

を考慮してプロットすると地上観測の値の緯度変化とよく一致する。してがってロケット観測で得られた最大電子密度に関する限り電離層の傾斜あるいは k ベクトルの補正をする必要がないように思われる。

これらの点を総合すると、K-9 M-38 ロケットの観測時刻には、上昇時、下降時の電子密度プロファイルは第5図点線のように補正するのがもっともらしいかもしれない。

謝 辞

K-9 M-38 号機ロケット実験は宇宙航空研究所特別事業として行なわれたもので関係各位のご協力に深甚の謝意を表する。

受信した依佐美局については電波休止時間の変更その他で電気興業株式会社のご協力を得た。ロケット搭載装置は明星電気(株)の製作になるが特に阿部誠氏にご苦勞をおかけした。ロケット発射時の電離層地上観測のデータは郵政省電波研究所、および Boulder の World Data Center A から頂いた。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ご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、本実験にご協力頂いた橋本弘蔵、藤田正晴、横井省吾君達、その他研究室の方々に感謝の意を表する。

1973年1月31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, 平石, 富本: 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, 東大宇宙研報告, 第8巻, 第1号, 98, 1972