

K-9M-29 号機による VLF ドップラー観測*

木村 磐根**・平石 謙治**

1. 緒 言

ロケットによる電離層の電子密度の観測法として、わが国では直接法では、各種プローブ法がおもに使用されてきたが、間接法の一つである VLF 電波を用いたドップラ法も数回実験され、その方法の利点が認識されてきた。ただこれまでの実験ではプローブ法との同時観測がなく両方法の同時比較ができなかったこと、ドップラシフトの測定精度が不十分であったことなどのために、精度の高い同時比較の実験が望まれていた。

K-9M-29 号機は上記の目的を含めて計画された電波専用親子ロケットで、インピーダンスプローブ、ラングミュアプローブの二つの直接法の装置を搭載するほかに、MF, HF, VLF 帯の電波の親子ロケット間の伝搬特性の測定と以下に述べる VLF ドップラ実験が行なわれた。

VLF ドップラ実験は今回は検見川からの 40kHz 標準電波 (JG2AS) のほかに、オーストラリアの 22.3kHz (NWC 局) の信号のドップラシフトも観測し、2 周波数のドップラからそれぞれ独立に求められた電子密度の相互比較も行なってみた。また NWC 信号については地表伝搬と南半球から磁力線にガイドされたホイスラー伝搬の 2 波が予想され、ロケットではその到来方向がほぼ逆であるためドップラシフトが異なり、容易にこの二つが弁別できることが期待されていた。したがって南半球の局の VLF 電波のホイスラーモード伝搬波の検出、ひいては現在問題になっている磁気圏内のダクトの検出に利用できることが予想された。

本ロケットは昭和 45 年 1 月 27 日 19 時 20 分之内浦より発射され最高高度 356km に達し、VLF ドップラ実験としてはその目的はすべて達成された。ただ電子密度の相互比較についてはインピーダンスプローブがたまたま信頼できるデータが取れず比較できなかった。

第 1 図は本親子ロケットの開頭、アンテナ展開の状態を示す。ドップラ実験用アンテナは手前左の角形ループアンテナである。

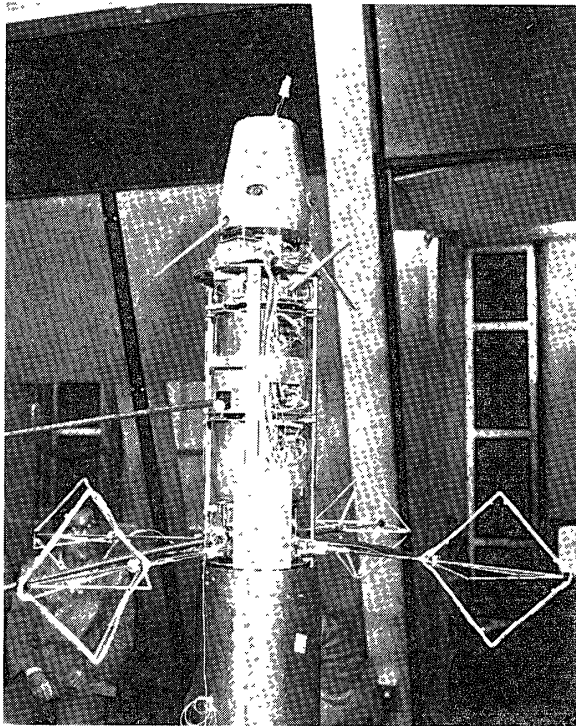
2. 実験装置

2.1 ロケット搭載装置

今回の実験に使用したロケット搭載受信機のブロック図を第 2 図に示す。センサは 40kHz

* 宇宙研特別事業費による論文

** 京都大学工学部



第1図 K-9M-29 開頭アンテナ展開

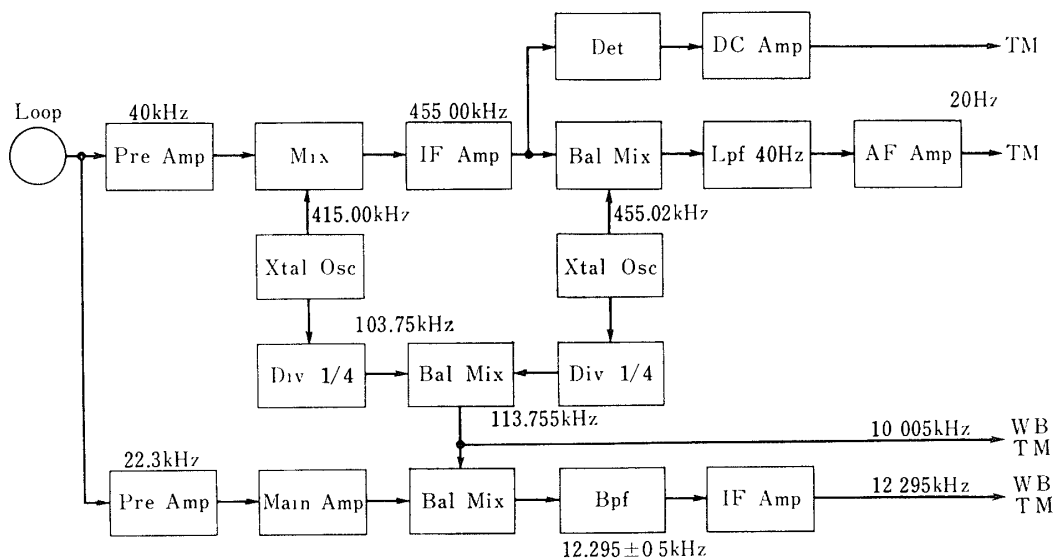
(JG2AS), 22.3kHz(NWC) 信号に同一のループアンテナ (実効高 $1\sim 3 \times 10^{-4}m$) を共用した. 40kHz の信号はプリアンプで増幅後 415.0kHz の水晶発振により 455 kHz の IF に上げ AGC アンプをとおしたあと検波して電界強度の情報を得. またドップラシフトを測るためにさらに455.02 kHz の水晶発振により周波数変換して約 20Hz のビート信号としてそれぞれテレメータ IRIG #5, 11 で地上に伝送される. この場合二つの水晶発振器の周波数の差がドリフトするとビート周波数がそれだけ変動して誤差となるので, 上記 415.0, 455.020kHz の差の 1/4 をとり 10.005kHz としてこれを広帯域テレメータにて地上へ伝送された.

一方 22.3kHz の信号は増幅したあと, 前述の 10.005kHz により周波数変換して

12 295kHz の信号として広帯域テレメータで地上に伝送した.

2.2 地上処理装置

ドップラビート周波数の測定精度をあげかつ搭載装置を簡単化するため, 今回は搭載受信機の局部発振器の水晶を高安定度のものにせず, むしろ局発の差の 1/4 (=10.005kHz) が地上にテレメータされた. この周波数のドリフトを正確に測定して補正すればドップラビート



Block Diagram of The Doppler Receiver Borne in The K-9M-29

第2図 ロケット搭載装置ブロック図

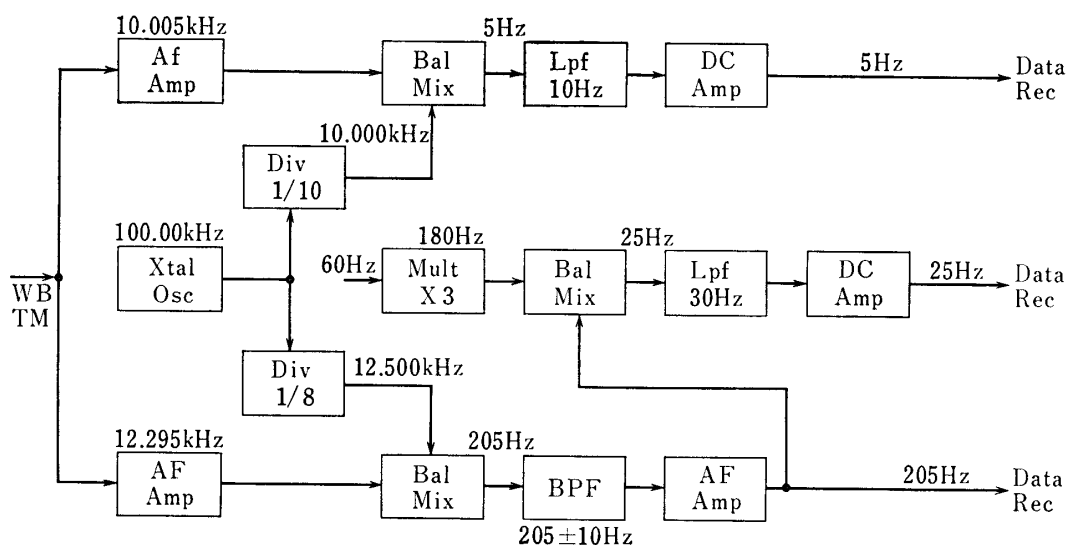
が正確に測定できることになる。

さて地上へテレメータされた 10.005kHz と、NWC 信号が変換された 12.295kHz の信号はそのまま磁気録音すると再生時に 0.1% 程度のワウ・フラッタのため 10Hz 程度の周波数のふらつきが加わり、1~5Hz のドップラシフトを正確に測定することはできない。そこでテレメータ信号からリアルタイムでさらに低い周波数にビートダウンしたあとデータレコーダに記録される。

上述のリアルタイム地上処理装置のブロック図を第3図に示す。

地上装置は 100.00kHz の超高安定度水晶発振器を備えており、それを 8 分周、10 分周して 12.5kHz、10.0kHz を得ている。この周波数と前述の 12.295、10.005kHz とでそれぞれビートを取りそれぞれ 205、5Hz を得る。この 2 周波数と、40kHz 信号からロケット内で直接ビートダウンされた 20Hz 付近のビート周波数がともにデータレコーダに同時記録される。

なお第3図には上記 205Hz を商用周波 60Hz の 3 倍高調波 180Hz と混合して 25Hz のビートを作りデータレコーダに記録されるようになっていたが、この信号はあとの解析であまり質が良くなかったので電子密度を求める際には 205Hz のビートが用いられた。



第3図 地上処理装置ブロック図

3. 実験結果

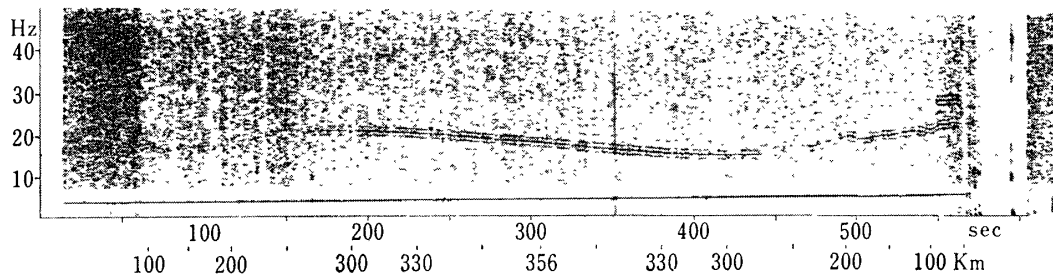
3.1 ドップラシフトの解析

テレメータされたドップラビートは、前項で説明したようにリアルタイムの地上データ処理により適当な周波数のビートに変換されて一たんデータレコーダに記録された。40kHz (JG2AS) の信号は 20Hz 付近のビートになっていたから、これを 10 倍の速度で再生し、再び録音、4 倍速度再生を 2 回行なって周波数を計 160 倍に上げ 3.2kHz 近辺の周波数としてこれがソナグラフで周波数分析された。第4図はこの信号のドップラビートのソナグラムであり、全飛行時間約 600 秒が 160 倍の周波数 step-up のため 1/160 に縮まり、短いソナグラ

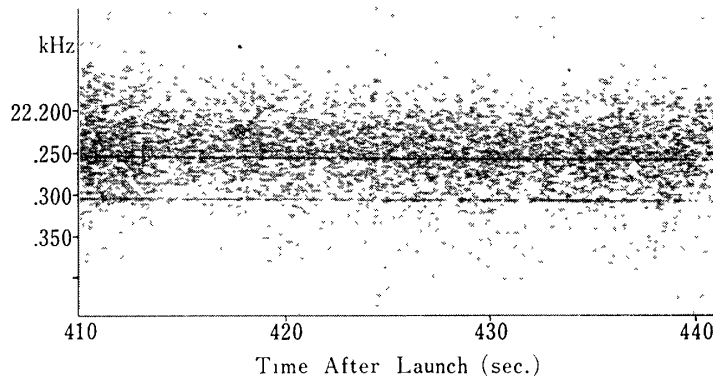
ムにおさまっている。

22.3kHz(NWC) の信号については、これが約 200Hz のビートとして記録されているので、これを再生時 20 倍に上げてソナグラムをとると第5図のようになり 22.300kHz と 22.250kHz に相当した2本の直線が得られる。これは原信号が-50Hz の FSK (Frequency-shift-keying) されているためであって、モールスコードのマーク、スペースに対応してこのどちらかの周波数がでているのである。

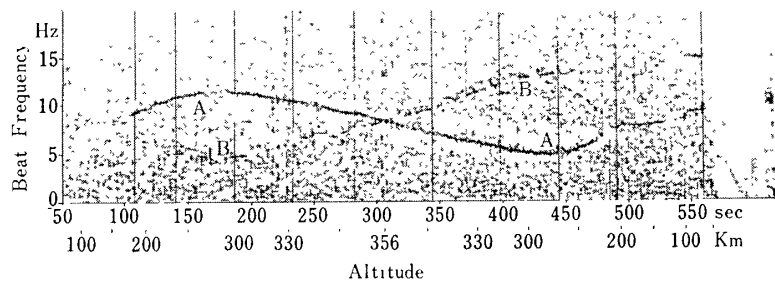
次にこのビートをさらに 10 倍の周波数に step-up (計 200 倍) 22.300kHz 付近のみを拡大してソナグラムをとると第6図のようになる。同様にして 50Hz 下の 22.250kHz 付近についても上図とほとんど同じソナグラフが得られるが完全には一致しない(そのずれは通常わずかであるが最大 0.3Hz 程度が認められた)。これは 22.300kHz 信号は 5×10^{-11} の周波数安定度をもっているが、22.250kHz の方はあまり安定度がよくない(発表による) ことにもよるものと思われる。地上処理の際のワウ・フラッタも考えられるが、その場合にはソ



第4図 JG2AS 信号 (40.0kHz) のドップラビート

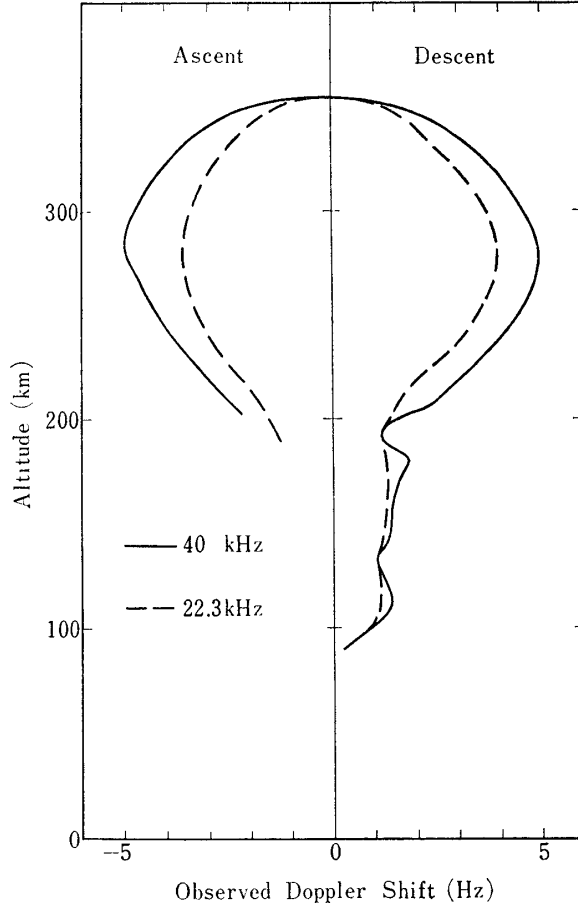


第5図 22.300kHz 付近の受信スペクトルのソナグラム



第6図 NWC 信号 (22.3kHz) のドップラビート

ナグラムの線の幅の広がりとして現われるだけで上記の差の原因ではありえない。以下の解析では 22.300kHz 側のビートを使った。



第7図 観測されたドップラシフト

これらのソナグラムから実時間で 10 秒おきにビート周波数を読みとり、ロケット搭載の標準水晶発振器の周波数ドリフト（データレコーダに 5Hz として記録されたビートの変動）分を測定して補正し、かつロケットのスピンの周波数（2.90c/s 右廻り）だけのずれを考慮すると、正味のドップラシフトが求められる。これを 22.3kHz, 40kHz 両者についてプロットすると第7図のようになる。

3.2 電子密度分布

ドップラシフトの値 Δf から電波の屈折率 μ また電子密度 N_e を求める手順はすでに報告 [1] されているから詳細は省略するが、

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

にスネルの法則を適用して変形した下式

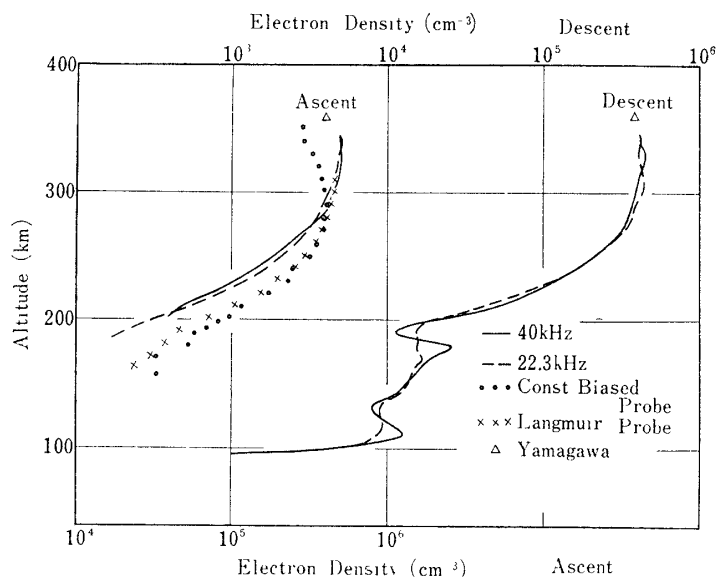
$$\Delta f = \frac{f}{c} (V_x \cos \beta \sin \rho_0 + V_z \sqrt{\mu^2 - \sin^2 \rho_0}) \quad (2)$$

を使用する。ここで σ はロケット速度ベ

クトルと電波の \mathbf{k} ベクトルのなす角、 V_x, V_z はロケットの軌道面内での水平、垂直速度、 β は電波の電離層への入射の \mathbf{k} ベクトルの水平面への射影とロケット軌道面とのなす角である。また ρ_0 は電波の電離層への入射角（垂直入射を 0° として計る）である。 f, β, ρ_0 が既知量であるから（ ρ_0 は電波が地表を grazing で電離層に入射すると仮定して定めるが、この仮定による誤差はわずかである） V_x, V_z がわかれば Δf から μ が定められる。

ここで V_x, V_z はトラポン (radar transponder) のデータを使用するが、レーダのメカニカルな動きの変動が加わっていてそのままではわれわれの解析には使えない。そこでロケットの軌道を、頂点を出発点として自由落下問題として運動方程式を解き、トラポンのデータに最も良く一致する様なパラメータを決定して軌道方程式を定め、それから逆に V_x, V_z を計算機で計算する方法をとった。

上記の方法で決定された屈折率 μ から、アプルトンハートレーの関係式を用いて電子のプラズマ周波数を求めた。得られた電子密度分布は第8図のようになる。この結果で驚くべきことは、送信点、周波数が全く異なる二つの信号（22.3kHz, 40kHz）により得られた電子密度分布がきわめてよい一致を示したことである。これはさきにも述べたように電波の電



第8図 ドップラ法およびプローブ法で求められた電子密度分布

第1表

	稚内	秋田	国分寺	山川
地理緯度経度	45.4°N 141.7°E	39.7°N 140.1°E	35.7°N 139.5°E	31.2°N 130.6°E
地磁気緯度	35.3°	29.5°	25.4°	20.3°
$f_0F_2^*$	5.0MHz	4.3	4.6	5.7
$h'F_2^*$	225	250	250	255
$h_pF_2^*$	265	280	340	370

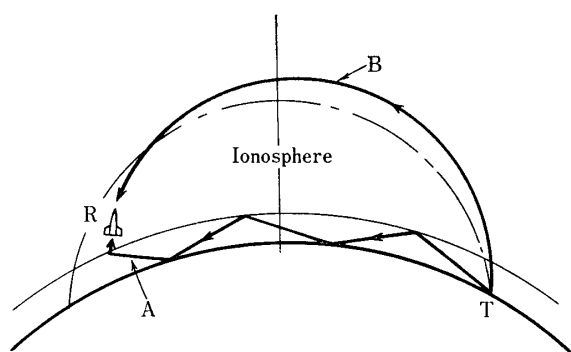
* 1970年1月27日 1930 JST の地上観測

離層への入射角等について行なった仮定が正しかったことを示す証拠にもなる。なお、これらの計算の上で行なったもう一つの仮定は、電離層を局部的に平面電離層で近似し、かつその平面が地表と平行と仮定している。しかしこれは厳密には正しくない。たとえばロケット発射時の電離層垂直打上げのデータは第1表のようになっている。これだけでは電離層の勾配は定められないが、近似的に h_pF_2 を等電子密度線と考えると傾斜は約 5° で赤道側が高いことになる。しかしこの程度の勾配を考慮しても計算結果の違いは電子密度で数%以下でほとんど問題にならないことがわかった。

次に他のプローブ法の結果との比較であるが、第8図には上昇時のラングミュアプローブ、および constant biased probe の結果を併示した。これによると 300km の高さでは一致しているが、それ以下ではプローブの方が若干高くでている。これはプローブの表面に残った contamination のためであろう[2]。300km 以上はロケットの垂直速度が非常に小さくなるので、ドップラ法の結果もあまり信頼できなくなる。なお同図には同時刻の山川の電子密度の地上観測結果 (f_0F_2 および h_pF_2) をも示したが、われわれの得た結果とよく一致している。

3.3 ホイスラモード波の弁別

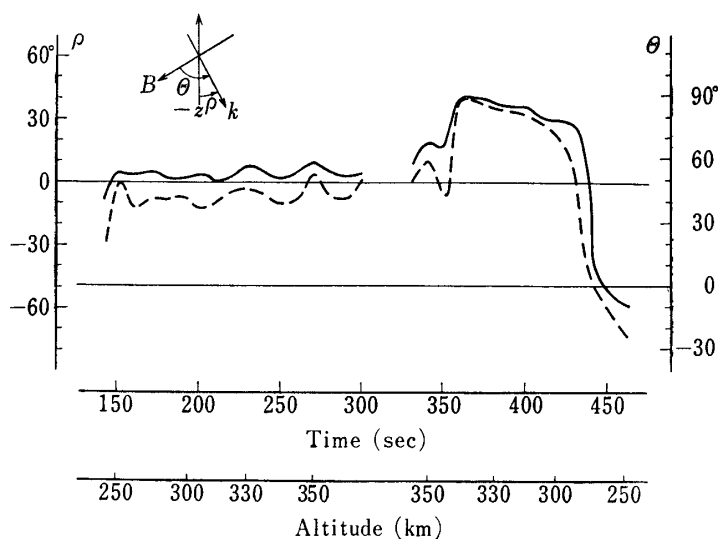
22.3kHz NWC の信号のドップラビートのソナグラムは第5図に示したが、同図中 A の sine カーブは南半球の波線から、電離層-大地間を導波管モードでやってきて、下側からロケットに到達したものである(第9図通路A参照)。ところで一方Bで示す少し淡いカーブ



第9図 NWC 信号の伝搬路

結果によると B の強さは最大値で A から 5db 程度低い程度であった。

このソナグラムからしたがってホイヌラモード波(B)のドップラシフトが得られるから、Aのドップラシフトから決定された電子密度分布(第8図)を使うと(1)式から逆に電波の k ベクトルの方向が決定できる。ただしこの場合の電波は k ベクトルが磁気子午面内にあると仮定しなければならない。この仮定のもとに計算した k ベクトルの方向を第10図に示す。これからみると、ホイヌラモードの電波は広範囲の場所で上からほぼ垂直下方に向いた k ベクトルをもって伝搬してきていることがわかる。ray tracing を行なうことにより、この結果から外気圏中のダクトの存否などを知ることができる。

第10図 ホイヌラ伝搬波の伝搬ベクトル(k)の方向($-z$ は垂直下方、 B は地球磁場方向を表わす)

4. むすび

ドップラ法は元来电離層の電子密度測定法としてロケット観測では最初に用いられたものであるが(セドン法)、各種プローブによる直接法が開発されてくると、ドップラ法はだんだん使われなくなる傾向になってきている。しかし直接法は電子密度の相対的変化の検出には powerful であるが、その絶対値についてはプローブ表面の contamination や、calibration の

面倒さなどの原因により必ずしも常に信頼性の高いデータが得られるとは限らない。

一方 VLF ドップラ法はここに報告したように、南半球からの電波 (NWC) を用いても北半球の電波 (JG2AS) を用いてもほとんど同じ電子密度分布が得られることが明らかになった。JG2AS の電波は通常昼間だけだされているが夜間観測のためにはこれまでから特別に電波発射時間を延長して頂いていた。NWC の信号は年中ほとんど休みなし (日本時で月曜日午前中のみ停波する) で大電力 (1MW) であること、電離層通過の際の減衰は後者の方が周波数が低いため小さいことを考えると今後はおもに NWC 信号を使用することにすれば比較的簡単にいつでもロケット観測ができることになる。40kHz の電波は昼間は電離層通過の減衰が大のためこれまでから夜間観測にのみ使用されてきたが、22.3kHz ならば多分昼間実験も可能となるであろう。

またごく最近依佐美の VLF 局 (17.4 kHz) が周波数安定化され、かつ24時間運転になったと聞いている。この電波を用いれば電離層による減衰はさらに低いから昼間の実験がもっとやりやすくなる。

今後この VLF ドップラ法が今までよりもっと一般的に標準搭載機器として使われるよう装置の簡単化、地上データ処理装置の標準化を計りたいと考えている。

謝 辞

この実験は東大宇宙航空研究所の方々の絶大なるご協力によってできたことを記し厚く感謝する次第である。

40kHz 標準電波の発射については郵政省電波研究所佐分利氏、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、瓜本、阿部両氏その他に負うところが大きい。ロケット発射時の電離層地上観測データは電波研究所新野氏に労を煩わせた。ここにあわせて謝意を表わす。

なお、筆者らが平素から御指導をたまわり、特にこのドップラ実験をサポートして下っている前田憲一教授および周波数測定技術で御指導いただいた小川 徹教授に感謝致します。またこの実験は電波専用ロケットで行なわれたが、ほかのプロジェクトの名大空電研岩井教授、鎌田助教授、また京大松本 紘氏および実験を手伝って下さった研究室の方々のご協力に謝意を表する。

1971 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, 173~185, 1967.
- [2] Kimura, I. & K. Hirao: Rocket Experiment of Electron Density Measurement by VLF Doppler and Probe methods, paper presented at COSPAR Symposium, Leningrad, May 1970. (to be published in Rep. Ionos. Space Res. Japan)