

S-310-18 号機による中波強度の高度分布から
D 層電子密度分布の推定

長野 勇**・岡田敏美***・井上良彦**
牧野将美**・森田慎一郎**・満保正喜**

(1988 年 12 月 26 日受理)

Estimation of Electron Density Profile in the D Region
From the Altitude
Profile of MF Radio Wave
Intensity Observed by S-310-18 Rocket

By

Isamu NAGANO, Toshimi OKADA, Yoshihiko INOUE,
Masayoshi MAKINO,
Shin-ichiro MORITA and Masayoshi MAMBO

Abstract: The altitude intensity profile of the MF radio wave transmitted from Kumamoto was observed by the sounding rocket S-310-18. An electron density profile in the D region was estimated by comparing the observed value with the MF radio wave absorption calculated by the generalized full wave method when the collision frequency is proportional to an atmospheric pressure. The obtained electron density profile showed a distinct peak at an altitude of 72km and showed an almost constant value of 600(1/cc) in the altitude range from 74km to 85km. The estimated errors of the electron density vary in the range from —

* 宇宙研特別事業費による研究論文
** 金沢大学工学部電気・情報工学科
*** 名古屋大学空電研究所

20 % to +30 % even if the collision frequency has the fluctuation of ± 30 %. This method gives a fine structure of the electron density in the D region compared with the VLF absorption method.

1. まえがき

ロケットによる電子密度の測定法には、インピーダンスプローブ法などがあるが、大気分子と電子の衝突回数の高い領域での 10^3 個/cc 以下の低電子密度を測定する決定的な方法はまだないようである。筆者らは、下部電離層の電子密度分布を測定するために、VLF モード特性減衰法を提案し、これまで数回のロケット実験を行い、地上局 VLF 波強度及び偏波の高度分布を測定し、観測値と full wave 計算結果を合わせることにより、D 層付近の低電子密度分布 ($N < 10^3$ 個/cc) を明らかにしてきた [1][2]。S-310-18 号機では、波動法 [3] による E 層付近の衝突回数の測定のために地上局 VLF 波強度の高度分布を測定した。また、EXOS-D 及び GEOTAIL の波動観測の機器テストも兼ねて、JJY (8 MHz) 及び NHK 熊本第 2 放送波 (873 kHz) 強度の高度分布を測定した。この中波放送強度の高度分布には、下部電離層の電子密度に強く依存している特徴が顕著に現れていた。本論文ではこの中波強度の解析に焦点を絞り、下部電離層の衝突回数分布の仮定のもとで、電子の速度依存による衝突断面積を考慮した [4] full wave 計算 [5] を用いて、中波強度の減衰特性から、下部電離層の電子密度分布の推定法、及びその結果について述べる。本方法は、従来、著者らが行って来た、VLF モード特性減衰法で得られるものより高度分解能に優れ、細かい電子密度の構造が推定できる。また、解析における仮定が少ないなどの特徴がある。

2. 実験の概要

S-310-18 号機は、冬期の午前 11 時頃に内之浦上空、高度 100 km 付近に現れる電子温度の異常上昇を調べるため、電子温度、大気光、電子密度、衝突回数、電離層プラズマ波動

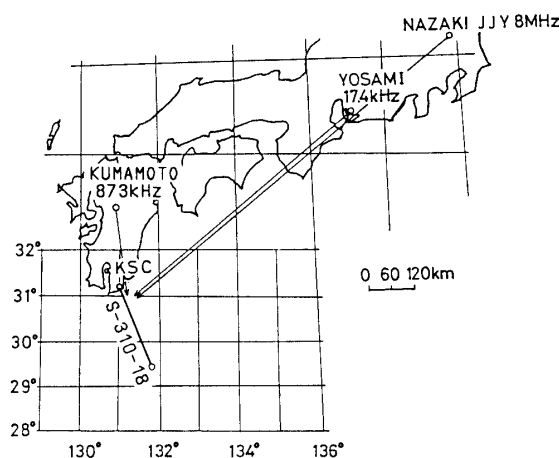


図 1 S-310-18 号機の軌道とロケットで観測した地上局の電波通路

の5項目の測定器が搭載され、昭和63年1月26日午前11時00分に鹿児島宇宙観測所から打ち上げられた。ロケットは上下角78度で多発され、発射後3分43秒で最高高度202 kmに達し、7分10秒後に内之浦の南南東210 kmの海上に落下した。その間全ての搭載機器は、正常に動作した。また、筆者らの測定器は、愛知県依佐美から送信されているNDT局17.4 kHz (放射電力200 kW)の電波と、茨城県名崎からのJJY局8 MHz (放射電力2 kW)の電波、及び熊本県熊本市からのNHK熊本第2放送873 kHz (放射電力500 kW)の電波を受信した。図1にS-310-18号機の軌道と受信した地上局電波の通路を日本地図上に示す。また、本ロケットでは、一部EXOS-D及びGEOTAIL衛星搭載の機器テストを兼ねて、VIP (vector impedance) 装置によるホイップアンテナのインピーダンス計測、及び、シリーズトランス方式によるループアンテナの広帯域化テストが行われた。

2-1 観測装置

ロケットに搭載した波動観測装置のブロック図を図2に示す。センサーは、写真1のように磁界測定用に10回巻の静電シールドされた三角型ループアンテナ (ループ面積：約1060 cm²) と、電界測定用の長さ (tip-to-tip) 2.6 mのダイポールアンテナである。また、1個のループアンテナで、VLF帯から中波帯までの広帯域化を計るため、トランスを2個用い、それらをループアンテナと直列に接続している[6]。VLF用トランスの1次：2次の巻数は14：736、MF用は6：54である。このループアンテナのプリアンプの利得20 dBを含めた実効長は、5 kHzで3.6 cm、17.4 kHzで14 cm、873 kHzで26 cmである。WB受信機は、1~15 kHzの広帯域の電界と磁界を測定し、WBテレメータで地上にデータを送っている。VLF受信機は17.4 kHzの電界と磁界、MF受信機は873 kHzの磁界、SW

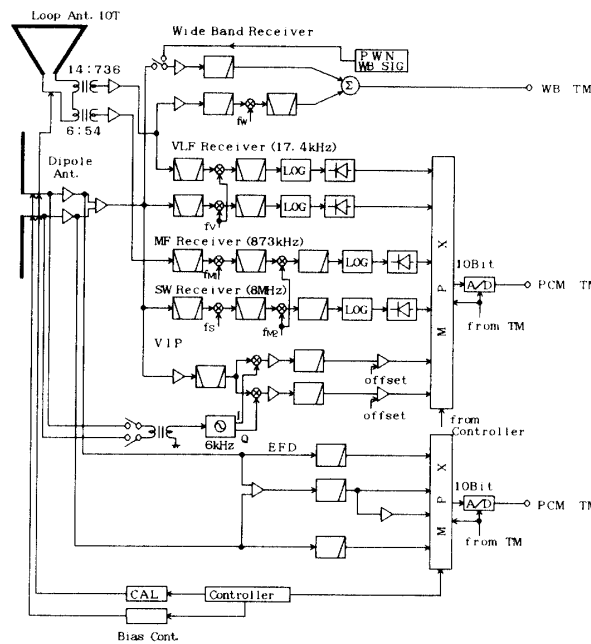


図2 S-310-18号機波動観測装置のブロック図

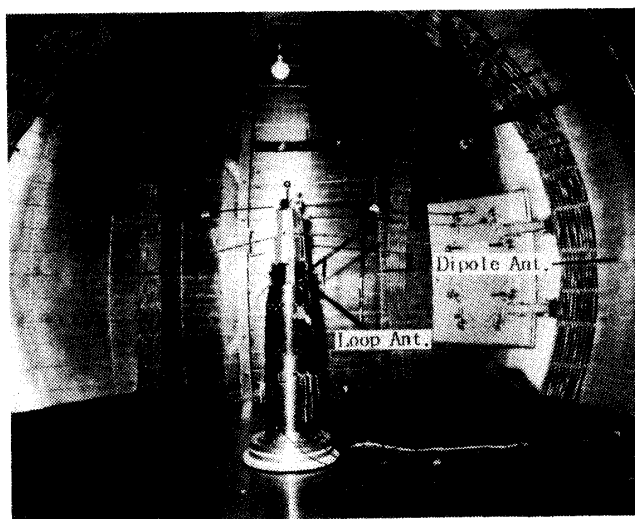


写真 1 ISAS 磁気シールドルーム中におかれた S-310-18 号機の
開頭部

受信機は 8 MHz の電界を測定した。VIP は、ダイポールアンテナのインピーダンスの測定、EFD は、DC 電場の測定を行い、いずれも PCM テレメータで地上に 10 msec 毎にデータが伝送され、有意義な観測が行われたことが報告されている [7]。

2-2 中波磁界強度観測値

S-310-18 号機ロケットは、発射後 45 秒 (高度約 58 km) で開頭し、47 秒でループアンテナが展開し、49 秒でダイポールアンテナが伸展した。このロケットの開頭部は、電波を通す材質であり、また、搭載したループアンテナは、折り畳んだ状態でも面積を持っていた (ループ面積: 約 78 cm²) ので、発射直後から NHK 熊本第 2 放送の磁界強度が測定された。図 3 にそのテレメータ出力を示す。ロケットの発射とともにテレメータ出力電圧が上昇し、ループアンテナの展開後一旦飽和し、その後電離層により減衰し、発射後 65 秒で急激に減少している。また、細かい振幅の変化は、ロケットのスピンの影響である、スピン周波数は、発射後 40 秒まで 2.5 Hz でその後 1 Hz であった。

図 3 のロケット上昇時のテレメータデータを、磁界の絶対強度と高度に変換したものを図 4 に示す。アンテナ展開後の飽和部分は、アンテナ展開前の飽和していないデータの全てのスピンによる強度変化を、最小二乗法により近似し、それを飽和している部分と比較し、その裾特性がスピンによる波形と最もよく一致するように飽和部分のデータを補正した。また、アンテナ展開後のループ面積は、展開前のそれに比して 13.6 倍になるので、アンテナ展開前のデータを 22.7 dB 上昇させた。その結果、図 4 にみられるようにアンテナ展開前後 (高度 60 km 付近) で強度が滑らかに接続していることが分かる。発射直後から高度 20 km までの磁界強度の上昇は、熊本ーロケット軌道間にある九州山地国見岳の尾根による回折伝搬から見通し伝搬となったためである。高度 65 km からの緩やかな減衰は、ロケットが下部電離層 (D 層) に突入したことを示している。そして、高度 88 km で放送

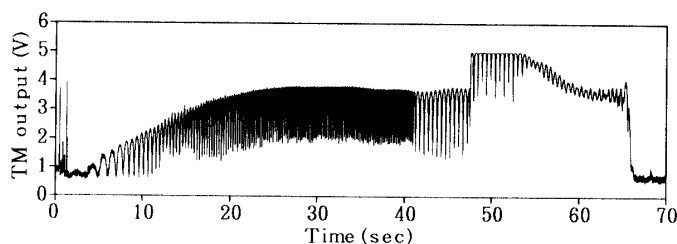


図3 S-310-18号機による上昇時のNHK熊本第2放送波磁界強度のテレメータ記録

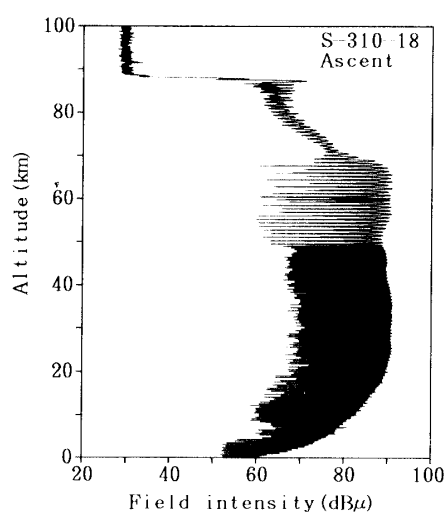


図4 中波(873 kHz)磁界強度(Z_0H)の高度分布の測定値
($0 \text{ dB}\mu = 1 \mu\text{V/m}$)

波は、完全に反射され、それより高い高度では、エバネッセントモードになり急激に減衰している。高度89 km以上の観測強度は、受信機のノイズレベルとほぼ一致している。また、反射点で電波の集束効果により磁界の振幅が大きくなっている。

3. 電子密度分布の推定

3-1 衝突回数の仮定

電離層中を伝搬する電波の減衰量は、電子密度と衝突回数関数として得られるので、電波の減衰量の観測のみから電子密度の推定は困難である。しかし、下部電離層の衝突回数は、理論的には大気圧に比例することが知られており、局所的には大きな変動はない。従って、これまでに観測された実験値を本論文に用いることができる。下部電離層中において、周波数が数 MHz 以下の電波の減衰 (Appleton Hartree 式) にもとづいて計算する場合、電子温度を考慮した一般磁気イオン化理論[4]を適用した方が誤差が小さいという

報告がある[8]。本論文においても、この理論を採用する。すると、電子の速度依存性を考慮した衝突回数 ν_m は、

$$\nu_m = K_m \times 10^5 P \text{ [Hz]}$$

となる。ここに、 P は大気圧 [N/m^2] で、 K_m は衝突比例定数と呼ばれている。衝突比例定数は、電子温度と大気温度が等しい仮定のもとで、室内実験で得られた酸素と窒素の衝突断面積から高度に関わらず一定で、6.3 という値が古くから知られている[9]。一方、これまでに内之浦で行われたロケット実験で、高度 80~95 km の範囲で、 K_m が 4.4 程度という値が求められている[10]。従って、本論文では、 K_m の値として、このロケット実験により得られた値 ($K_m=4.4$) を採用する。また、この時大気圧は、CIRA 72 の平均モデルから引用した[11]。以下の電離層中の磁界強度分布の計算には、実効衝突回数 (ν_{eff}) でなく、上述した電子のエネルギーの依存性の衝突回数 ν_m を取り扱える generalized full wave 計算を用いる。

3-2 減衰率から電子密度の推定

中波放送波 ($f=873 \text{ kHz}$) は、ロケット軌道上の電離層中では、L, R モード[12]として伝搬し、L のカットオフで反射する。従って、ロケットで受信したのは、L 及び R モードの上昇波の合成であると見なせる。その上昇波の減衰率と電子密度の関係を次のようにして計算した。図5のように、先に求めた衝突回数分布のもとで、電子密度を高度 50 km から指数的に増加させ、そして減衰領域でそれが一定になるように分布させる[13]。この電離層モデルに TM モードの平面電磁波を入射し、各高度で L, R モード上昇波の合成波の減衰率を generalized full wave 法により計算した。電磁界分布計算に必要な電子密度分布と衝突回数分布以外のパラメータを表1に示す。この様に一定電子密度分布を種々変えて、高度 65 km から 90 km まで、1 km 間隔で水平磁界成分の上昇波の減衰率 (dB/km) を求めたものが図6である。一方、図4の磁界強度観測値の高度分布から1スピン間の最大値を取って、各高度での減衰率を求め、図6の電子密度と減衰率の関係からその減衰率と対応する電子密度が得られる。しかし、図6の計算の過程においては、電子密度の高度

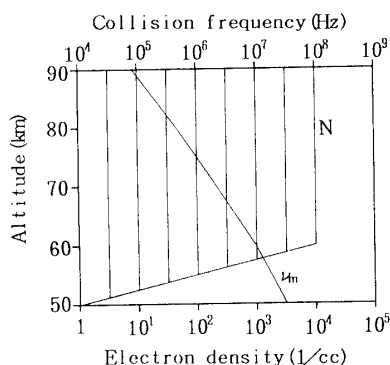


図5 上昇波の減衰率を計算するのに用いた電子密度及び衝突回数の高度分布モデル

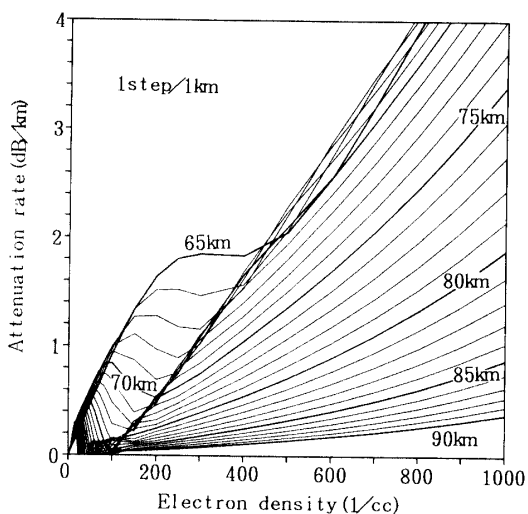


図 6 NHK 熊本第 2 放送を内之浦上空で観測した場合の磁界強度減衰率と電子密度の関係

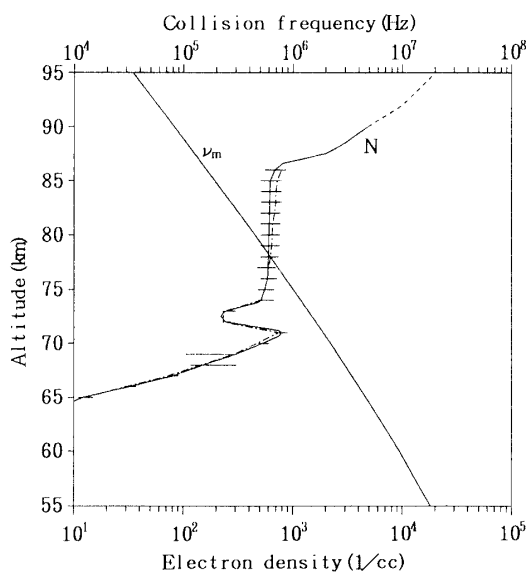


図 7 衝突回数分布 (ν_m) と推定した電子密度分布 (N)

90 km 以上の点線はインピーダンスプローブ法で測定された電子密度分布, エラーバーは衝突回数を $\pm 30\%$ 変化させたときの推定電子密度の変化の範囲を示す。また, 一点鎖線は高度によって入射角を変えて計算した減衰率から推定された電子密度を示す。

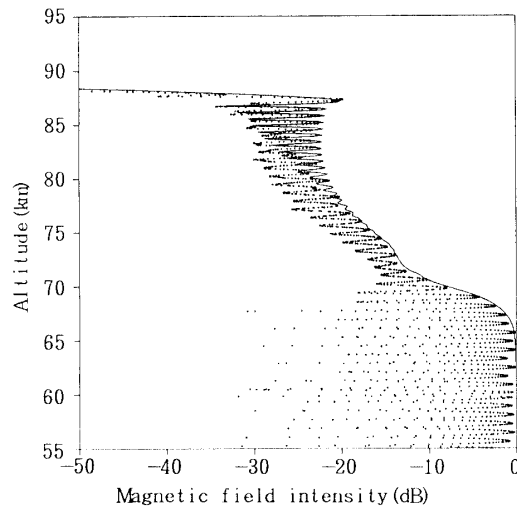


図8 推定した電子密度分布(図7)を用いて generalized full wave法で計算した磁界強度の高度分布(実線)と観測値(点線)

変化によって生ずる分反射による強度変化の効果が考慮されておらず、この様に一次近似として得られる電子密度には、誤差を含むものと考えられる。従って、更に近似度を高めるため、この一次近似の電子密度分布を用いて full wave 計算を行いその計算値と観測値がよく合うように元の電子密度を再度修正する。この様にして最終的に得られた電子密度の高度分布を図7に実線で示す。得られた電子密度分布には、高度 71 km に D 層の顕著なピーク値が存在し、その後一旦くぼみ、高度 75 km から 85 km までほぼ一定でその値は 600 個/cc 程度となっている。図7で、高度 90 km 以上の点線の部分は、同時搭載のインピーダンスプローブ法(宇宙科学研究所、渡辺氏提供)による観測値である。図7において、高度 73 km 付近の電子密度のくぼみは、図4の同高度における磁界強度観測値の減衰率の変化により推定されたものである。この観測値の変化は、ロケットの姿勢や受信機の急峻な変化で起こったものではないことが確かめられている。図7の電子密度分布(実線)による磁界強度合成波の計算値(実線)と観測値(点線)を比較して図8に示す。計算値には、ロケットスピンによる強度変化が含まれていない。図8の合成波の計算値(実線)をみると反射点の下方で上昇波と下降波による定在波が立っているが、高度 75 km 以下で上昇波のみとなっている。これは、Appleton-Hartree 公式による屈折率の計算では考えにくい、反射点付近で上昇波より下降波の減衰率が大きいかを示している。実際、図8の合成波の計算値を R, L モードの上昇波と下降波を分離すると図9のようになる。高度 65 km 以下では、実際の電波は自由空間モードとなっているが、特性波の計算ではそれが L_{up} , R_{up} の両モードに接続するように、両モードの振幅は、ほぼ -6 dB (入射波の強度を 0 dB として) で、それらの位相は同相となっている。一方、反射点からの下降波は、L モードであり上昇波より減衰率が大きいか分かる。図8の高度 80 km から高度 85 km

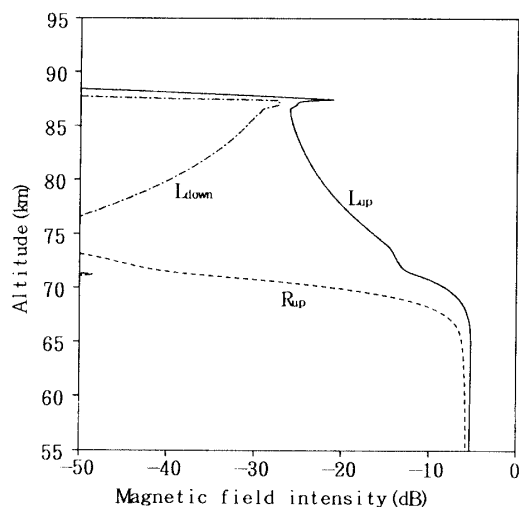


図 9 計算された特性波の高度分布

L 及び R は、左及び右回り偏波モードで、添え字 up 及び down は、それぞれ上昇波及び下降波を示す

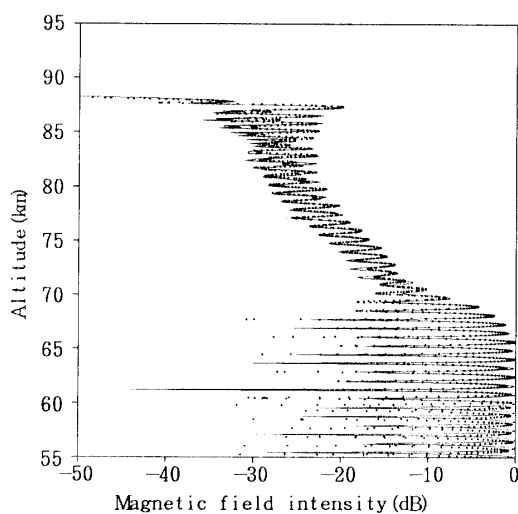


図 10 ロケットスピンの影響を考慮した磁界強度計算結果（実線）と観測値（点）の比較

において、計算値の定在波の最大値と、観測値の1スピン区内の最大値とは、あまり一致していない。それは、図10に示したロケットのスピンの影響を考慮した計算結果からも分かるように、ロケットの1スピン区間において必ずしも定在波の最大値を観測しなかったためである。図10は、ロケットの姿勢データ(GA及びDSS)を参考にして、スピンの効果を入れた磁界強度の高度分布の計算値(実線)と、観測値(点)とを比較したものである。図を見ると、両者が非常によくあっていることが分かる。

4. 推定結果の評価

図6の減衰率と電子密度の関係から1次近似の電子密度を求め、更に、観測値の高度分布と計算値を合わせて、最終的に電子密度を推定する手順において、生ずる誤差の要因は、以下のようなものである。

- (1) 表1に示した入射角以外の計算パラメータ値による誤差
- (2) 衝突回数の仮定による誤差 ($K_m=4.4$ の採用と、大気圧にCIRA 72モデルを用いたこと)
- (3) 平面波の電離層へ入射する角度 ($\theta_i=69.6^\circ$) を一定として計算することによる誤差

表1 計算に用いたパラメータ値

ジャイロ周波数	1.2 MHz
伏角	43°
方位角	176.6°
入射角	69.6°
周波数	873 kHz

(1)に関するパラメータ値は、高度が60 kmから100 kmに上昇すると、地球磁場方向から測った k ベクトルの方位角、地球磁場の伏角、ジャイロ周波数ともわずかながら変化するが、この変化に対する推定電子密度の誤差は、電磁界分布の計算の結果無視してよい程小さい。従って、電子密度推定における誤差の主因は、(2)と(3)によるものであると考えられる。(2)による誤差を調べるために、衝突回数分布を仮に全高度にわたって元の値の±30%に変化させてみた。その結果、図7に示したようなエラーバーとなった。しかし、実際には大気圧モデルが±30%も変化することは考えにくく、これによる電子密度推定誤差は、このエラーバーより十分小さいと思われる。(3)に関して、入射角は、送信所とロケットの位置関係から、幾何光学的にほぼ正確に計算できるが、ロケットの上昇につれて、ロケットに到達する放送波の電離層へ入射する角度は、だんだん小さくなる。具体的には、高度60 kmでの入射角は約72.5度、70 kmでは約70.6度で、10 km上昇すると約2度減少することになる。Generalized full wave計算では、平面波による一定の入射角で磁界強度の高度分布が計算されるため、入射角を一定に決めることによって実際の高度分布とわずかに違ってくる。そのため、電子密度の推定に誤差が生じる。そこで、今回推定した電子密度分布で、入射角が±3度変化した場合の磁界強度の高度分布の計算結果を図11に示す。入射角が小さくなると、全体的に減衰が小さくなり、わずかに反射点の高度が上昇する。図6のような減衰率と電子密度の関係を各高度の各入射角で求めると、電子密度の高度分布は、図7の一点鎖線の様になる。入射角一定の電子密度(実線)と比較すると、高度が75 kmより高くなると推定電子密度は、やや高めに、一方、高度が低くなると、電子密度はわずかに低い方にずれる。このように、たとえ衝突回数が±30%の変化

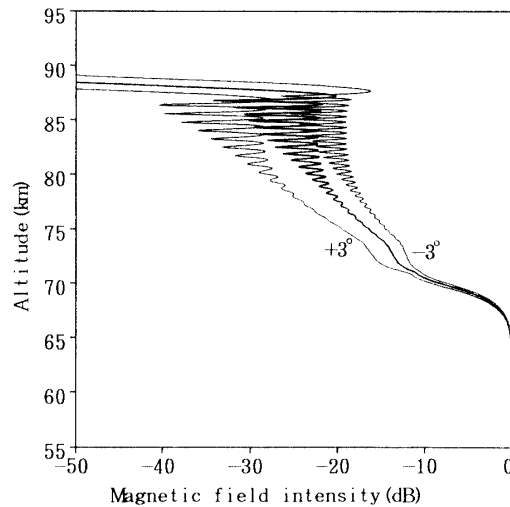


図 11 表 1 に示した入射角を中心に ± 3 度変化させた場合の磁界強度高度分布の変化

をしても、推定した電子密度分布は、元の値の $-20 \sim +30\%$ の範囲にある。また、入射角が高度によって変化してもそれは、 $-11 \sim +15\%$ 以内である。

以前に NHK 鹿児島放送局 ($f=700$ kHz) 波の、強度及びドップラービート周波数の測定が L-2-2 ロケットによって行われ、下部電離層の電子密度推定された [14]。測定された強度は、電離層中で約 50 dB の減衰があり、本論文で提案した方法でこのデータを解析することは可能であり、ドップラー法との電子密度分布と相互比較することにより、本方法の精度が更に詳しく議論できると考えられる。

5. ま と め

S-310-18 号機実験において、中波強度の高度分布のデータからその減衰率を求め generalized full wave 計算を使い、昼間の下部電離層の電子密度分布を推定した。推定した電子密度分布には、高度 70 km から 85 km までに D 層がみられた。そして、特に高度 71 km に顕著なピークがみられ、73 km に小さなくぼみが現れていた。

この方法は、測定装置が非常に簡単であり、平面波として解析できること、昼間の実験であるため反射波が減衰して多重反射の影響を考えなくてよいことや、VLF モード特性減衰法より細かい構造が推定できるという特徴を持っている。しかし、ロケットの上昇とともに入射角が変化するために計算値と観測結果とを厳密に比較するには ray theory を導入して、各高度における電離層下端への平面波の入射角を求めることを繰り返すなど、この問題の対策が今後の課題である。

また、ロケットのスピンの早ければ、反射点下方で観測される定在波の様子から、反射波の減衰率が分かり、それから衝突回数も同時に推定できることを示唆している。

謝 辞

このロケット実験は、宇宙科学研究所の絶大なるご協力によって行われたものであり、特に実験主任伊藤富造、小山孝一郎両氏に大変お世話になった。ここに深く感謝する。標準型インピーダンスプローブによる電子密度データは、同研究所渡辺勇三氏に、ロケットの姿勢のデータは、東海大学遠山文雄氏に頂いた。ここに合わせて謝意を表す。また、筆者らは、平素からご指導賜りこのロケット実験をサポートして頂いた京都大学木村磐根、松本紘両氏に深く感謝する。

ロケット搭載装置は、明和システム(株)の製作(ループアンテナは、明星電気(株)製作)であり、高野博氏に負うところが大きく謝意を表す。

なお、数値計算には、金沢大学計算機センター FACOM M-760/10 を使用した。

参 考 文 献

- [1] Nagano, I., Mambo, M. and Kimura, I.: Planet. Space Sci., **26**, 219(1978)
- [2] 長野勇, 満保正喜, 深見哲男, 難波宏司, 木村磐根: 信学論, **J64-B**, 11, 1273(1981)
- [3] 長野勇, 満保正喜, 深見哲男, 外村雅治: 宇宙科学研究所報告, **27**(1985)
- [4] Sen, H. K. and Wyller, A. A.: J. Geophys. Res., **65**, 12, 3931(1960)
- [5] Nagano, I., Mambo, M. and Hutatsuishi, G.: Radio Sci., **10**, 6, 611(1975)
- [6] Okada, T., Nagano, I., Hashimoto, K., Kimura, I., Oya, H. and Morioka, A.: Trans. IEICE., **E70**, 6, 550(1987)
- [7] 岡田敏美, 長野勇, 鶴田浩一郎: 第84回SGEPSS講演会, P 23(1988)
- [8] Deeks, D. G.: J. Atmos. Terr. Phys., **28**, 839(1966)
- [9] Thrane, E. V. and Piggott, W. R.: J. Atmos. Terr. Phys., **28**, 721(1966)
- [10] Nagano, I., Mambo, M., Fukami, T. and Morita, S.: Proceedings of ISAP '85, **242-6**, 1015(1985)
- [11] CIRA: Cospser International Reference Atmosphere Akademie-verlag Berline, (1972)
- [12] 前田憲一, 木村磐根: “現代電磁波動論”, オーム社(1984)
- [13] Seliga, T. A.: J. Geophys. Res., **73**, 21, 6783(1968)
- [14] Maeda, K., Obayashi, T., Iwane, K., Oya, H. and Ogawa, T.: Rept. Ionos. Space Res. Japan, **18**. 329(1965)