

電波吸収法による電子温度と中性大気温度比
及び D 層電子密度の測定

長野 勇*・岡田 敏美**・井上 良彦*・牧野 将美*・満保 正喜*

Measurements of the ratio T_e/T_n and the D
layer electron density deduced from the
radio absorption method

By

Isamu NAGANO, Toshimi OKADA,
Yoshihiko INOUE, Masayoshi MAKINO and Masayoshi MAMBO

Abstract: The S-310-18 rocket was launched on 26th January, 1988 at 11:00 JST. The main purpose of the rocket experiment is the study of the anomalous increase of the electron temperature in the mid-latitude E -region ionosphere during the daytime. Our instrument named COL-W, was installed to measure the temperature ratio of electrons to neutral particles, T_e/T_n , and the D -region electron density by the radio absorption technique. At the same time, some of the new wave instruments that will be used in the future spacecraft missions were tested.

This paper presents briefly the characteristics of the COL-W radio wave measurement system and the VIP by which the impedance of the dipole antenna is measured.

Next, the ionospheric parameters such as the electron density

* 金沢大学工学部電気・情報工学科

** 名古屋大学空電研究所

and collision frequency are estimated from absorption of radio waves transmitted from the ground in the VLF and MF bands.

It is found that the ratio T_e/T_n shows a peak of about 2.5 at an altitude of 105 km. This result is consistent with simultaneous measurements by the TEL instrument on this rocket.

1. ま え が き

冬期の内ノ浦上空に現われる高電子温度層のメカニズムの解明のため、E層熱エネルギー収支に関する総合実験として、S-310-18号機が、昭和63年1月26日午前11時00分に打ち上げられた。筆者らのグループは、この総合実験に寄与するため、VLF電波吸収法による中性粒子と電子の衝突回数を測定し、E層付近の中性大気温度(T_n)と電子温度(T_e)の比を解析すること及びMF電波吸収法によるD層電子密度分布の測定を担当した。また、このロケットには、EXOS-D及びGEOTAIL衛星の波動測定に関するテスト機器が搭載され、ダイポールアンテナのインピーダンス及び、ループアンテナの広帯域特性試験が行なわれた。筆者らに関する両実験において、いずれも良好な結果が得られ、これまでに、D層の電子密度解析結果と、機器テストに関して一部論文にまとめられている[1, 2]。

本論文では、主にE層領域の T_e/T_n 比の測定結果について記述し、そして、他の実験項目に関して、その後新たに得られた結果についても触れている。

2. 実験の概要

S-310-18号機に搭載された波動観測装置は、電波吸収法によるD層電子密度を測定するためのMF(中波)受信機、E層領域のエネルギー依存性衝突回数を測定するためのVLF及びSW(短波)受信機、そして科学衛星搭載機器テストのためのインピーダンス測定器(VIP)及び電場測定器(EFD)より構成されている。これらの波動測定のためのセンサーとして、ループアンテナ及びシステムアンテナが使用された。

MF受信機は、熊本市の近郊から送信されているNHK第2放送波873 kHz、放射電力500 kWの磁界成分強度を測定した。VLF受信機は、愛知県依佐美から送信されているMDT局17.4 kHz(実効放射電力、47 kW)の磁界強度を測定した。この電波は、これまで度々、下部電離層の電子密度の測定に用いられている[3]。そして、SW受信機は、茨城県名崎から送信されているJJY 8 MHz(放射電力2 kW)電波の電界成分強度を測定した。又、WB(広帯域)受信機はホイストラのような自然広帯域電波の他に、対島から送信されているオメガ局(10.2, 11.3, 13.6 kHz)の磁界及び電界成分も測定した。図1は、S-310-18号機の軌道と各電波受信機が観測した地上局電波の電波道路を示している。

2-1 観測装置

搭載機器の構成図を図2に示す。WB受信機は、周波数帯域1~15 kHzの電界と磁界成分を測定する。18 kHzにサブキャリアが立てられ、両チャンネルを0.5~36 kHzのバン

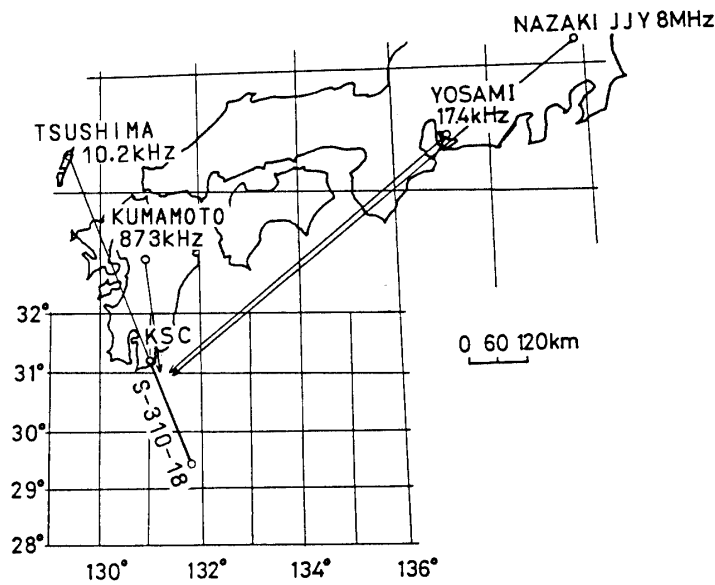


図1 S-310-18号機の軌道とロケットで観測した地上局電波の通路

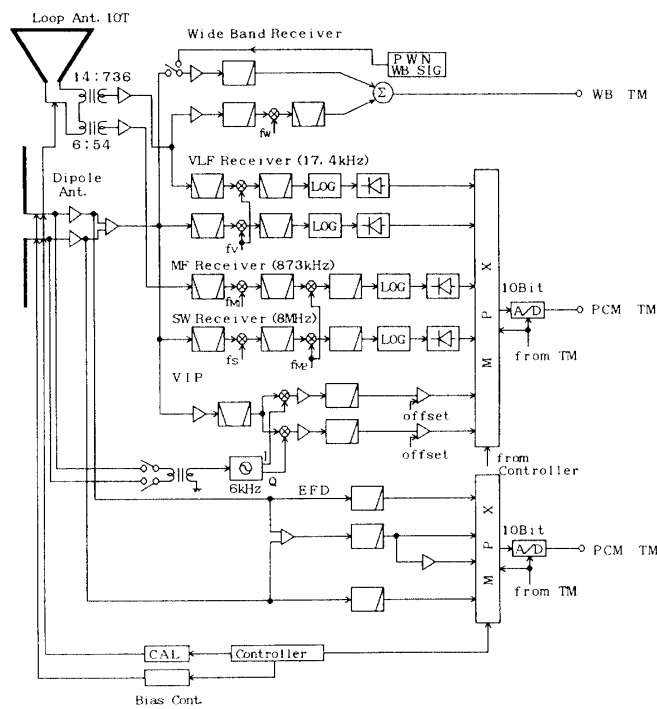


図2 S-310-18号機搭載波動観測装置の構成図

ド内に周波数多重化し，また観測信号の絶対値を較正するために，一定レベルのサブキャリアを残している。

VLF, MF 及び SW 受信機は，シングル及びダブルスーパーヘテロダイン方式を採用している。出力信号のダイナミックレンジを広くするため，交流擬似対数増幅回路が用いられている。これにより約 80 dB のダイナミックレンジが得られている。

VIP は，ロケット上昇時のみ動作し，ダイポールアンテナの複素インピーダンスを，周波数 6 kHz で測定した。

一方，センサーとして磁界測定用に 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 のステムアンテナが用いられた。図 2 に見られるように，1 個のループアンテナで，VLF 帯から MF 帯までの広帯域化を計るため，ステップアップトランスを 2 個シリーズに接続し，それぞれの帯域で S/N が最良になるように設計されている [4]。このループアンテナのトランス及びプリアンプを含めた実効長は，周波数 5 kHz で，3.6 cm，10.2 kHz で 8.2 cm，17.4 kHz で 24 cm，837 kHz で 22 cm である [2]。

以下に，これらの機器により測定されたインピーダンス及び，電磁界強度について述べる。

2-2 インピーダンス測定結果

アンテナのインピーダンス計測は，電界強度の絶対値を求めるうえで重要である。本ロケットでは，EXOS-D 搭載用 VIP 装置の機器テストを兼ねて，ダイポールアンテナの複素インピーダンスが測定され，オメガ信号及び NDT 信号の絶対電界強度の較正に用いられた。測定原理は以下のようである。アンテナに高抵抗を通して，交流電圧を加え，アンテナ端子電圧と印加電圧との振幅比と位相差を測定し，アンテナの複素インピーダンスを導出する。この振幅比と位相差を検出するには，アンテナに加える交流電圧と同相(Inphase)と 90° 位相差(Quadrature)の基準電圧に対して，アンテナからの信号を平衡検波し，それらの直流分(I, Q 信号)を測定する。この I, Q 信号の出力電圧とアンテナの抵抗値及び容量値との関係は図 3 のようになっている。この測定は，他の波動測定に与える影響を避けるため，ロケットの上昇時に限って，1 秒間隔で 0.5 秒間行なわれた。その結果を図 4 に示す。ダイポールアンテナのインピーダンスは，容量分(C)と抵抗分(R)の並列回路として表わされている。測定されたインピーダンスは，高度 80 km では容量的で，真空中の値に近い。一方，高度 130 km 以上の高度では抵抗的になっている。高度 90~120 km で，抵抗分が著しく変動している。これはアンテナのシース厚さに関係していると考えられる。シースに関するアンテナの直流電圧の計測結果はすでに報告されているが [5]，それによると，この高度範囲で，アンテナ電圧はロケット本体より 2 V 近く高い。また，ロケットのスピンの伴って，約 0.5 V 程度の電位変動が観測された。これにより，アンテナ周辺に生じているシースが顕著に変化し，R の変動に反映したものと考えられる。また，高度 100 km 付近の容量値は，理論の予想値より低くなっている [6]。これは，この近辺で，アンテナのプラズマに対する電位が大きく負に帯電し，大きなシースが生じていた可能性を示唆している。以上のように，VIP によるインピーダンス測定試験は良効に行なわれた。既に，

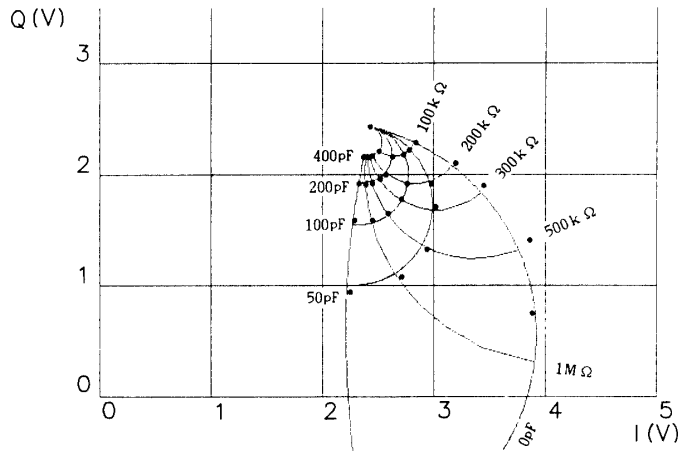


図3 VIP I/Q 信号対インピーダンス特性 ●印は飛しよう前の較正值

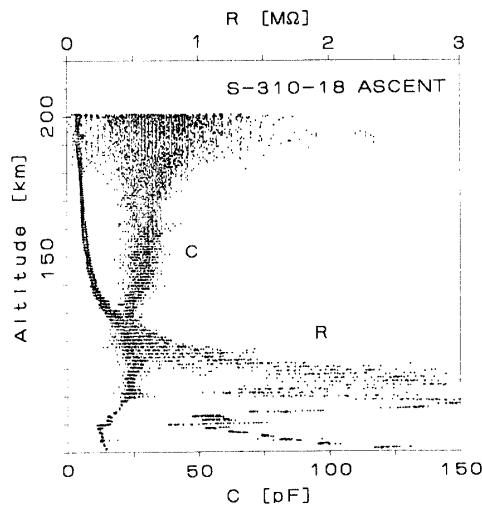


図4 ダイポールアンテナのインピーダンス抵抗値：+, 容量値：x

打ち上げられ、現在稼働中の EXOS-D 搭載の VIP 装置は正常に動作していることが確認されている[7].

2-3 WB 受信機によるホイスラ及びオメガ強度測定

WB 受信機による磁界強度測定は、上昇時及び下降時にわたって行なわれたが、電界成分測定は下降時のみ行なわれた。ループアンテナによって測定されたホイスラのダイナミックスpekトルの一例を図5(a)に示す。図に見られるホイスラの分散値は約26であった。このホイスラの絶対強度を図5(b)に示す。解析に使用されたFFTの諸元は次のようである。サンプリング周期が40 μsec, サンプリング数が512点, 移動平均時間が5 msecで、窓関数として折り返し窓が用いられている。図5(b)からこのホイスラ郡の強度-周波

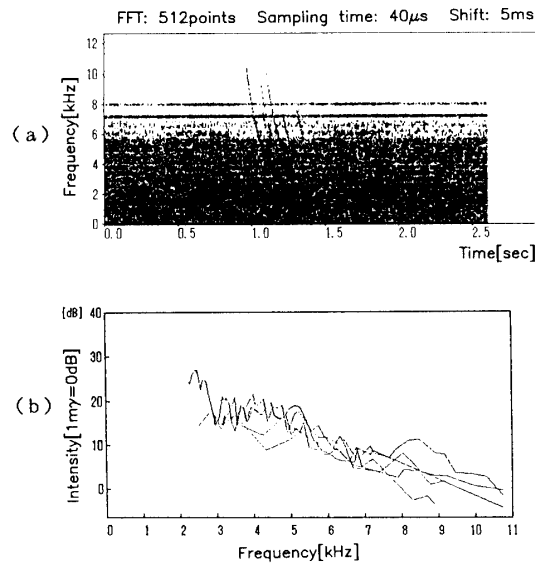


図5 WB受信機で観測されたホイストラの一例
 (a) : FFT解析による $f-t$ 特性 (高度 136 km, 下降時)
 (b) : 周波数-強度特性 (0 dB=1 m γ)

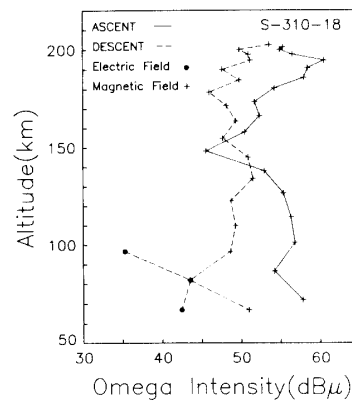


図6 WB受信機で測定した対島オメガ電波強度 (10.2 kHz)

数特性が -2.7 dB/kHz となっている。このような周波数特性の要因として、下部電離層による減衰であるか、磁気圏中の伝搬で生じたものかは、現在明らかでなく今後の課題である。また、WB受信機では、対島より送信されているオメガ電波強度が測定された。図6は10.2 kHzの上昇及び下降時に測定されたものである。特に、下降時において、電界成分の強対強度が測定されている。オメガ電波は10秒間に1回(1秒間)だけ送信されており、連続した高度分布が得られていない。

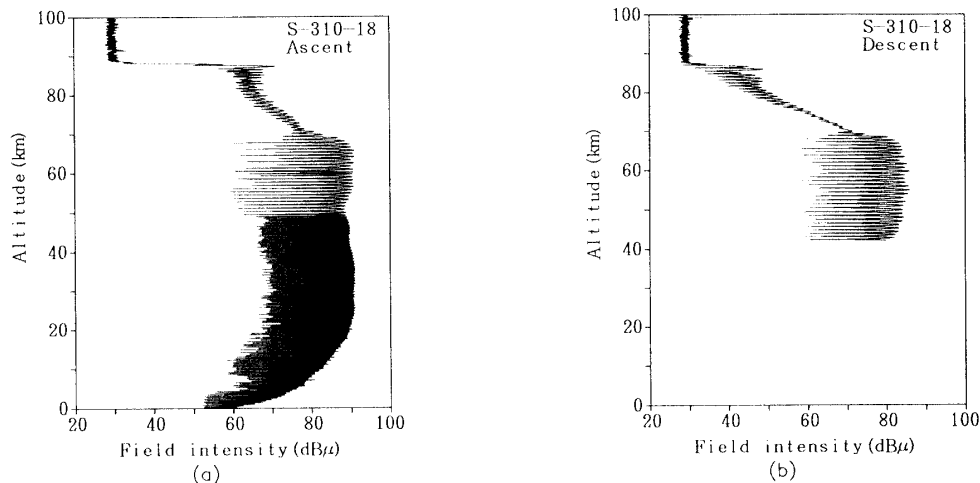
2-4 MF受信機による中波放送局電波強度とその解析による電子密度分布

ループアンテナの広帯域受信テストと中波強度の減衰特性からD層電子密度を測定す

る実験を兼ねて、NHK 熊本第2放送の磁界強度が測定された。図7(a)、(b)にそれぞれ、上昇及び下降時に測定された絶対強度を示す。

本ロケットは、発射後45秒で開頭し、47秒でループアンテナが展開した。このロケットの開頭部は、電波を通す材質であったため、開頭前で、アンテナが折りたたまれた状態でも電波を受信した。そのため、打ち上げ直後から、熊本第2放送電波を測定することができ、大変興味深い高度プロファイルが得られた。発射から50 kmまでは、ロケットのスピンの影響が0.2 Hzでその後1 Hzに減少された。このスピンによるループアンテナの指向性の影響が、測定値に見られる。ロケットの上昇と共に、磁界強度が増加しているのは、放送局—ロケット間にある。国見岳(1739 m)によって生じた山岳回折の効果によるものであった。上昇時、高度70 kmから強度が減衰し始めると共に、スピンによる強度変化が小さくなっている理由は、ロケットがD層に突入し、そのため衝突回数による減衰効果と直線偏波から特性波のLモードに移行したためである。そして、高度88 kmで、強度が少し強くなりその後急激に減衰している。この点が電波の反射点に相当している。反射点より高々度では、電波はエバネッセント波になるため急激に減衰した。一方、下降時(図7(b))においては、減衰パターンの傾向は上昇時と似ているが、反射点までの総減衰量に差がある。

測定されたMF波強度の高度分布と、電子のエネルギーを考慮された衝突回数(ν_m)モデルの使用のもとで、full wave 計算値と合うように、電子密度分布を推定する方法で[2]、D層中の電子密度を計算すると、図8のようになる。高度65 km付近から高度90 kmまでの電子密度分布が導出されている。特に、高度70 km付近において、微細な構造が見えている。そして、上昇時と下降時において、D層下部が約1 km低くなっていることは興味深い。



(a) : 上昇時

(b) : 下降時

図7(a)、(b) NHK 熊本第2放送波(873 kHz)の磁界強度(Z_0H)の高度分布 (0 dB=1 μ V/m)

2-5 VLF 受信機による NDT (17.4 kHz) 磁界強度分布

ロケットの上昇時及び下降時に観測された NDT の磁界強度分布を図 9 (a), (b) に示す。両図において、高度 60 km から 76 km までに見られる振幅変動は、ロケットスピンによるものである。高度 76 km 以上でスピンによる振幅変動が見られない理由は、NDT 信号電波が自由空間モードの直線偏波からホイストラモードの円偏波に変換されたためである。また、全体にわたって見られる小さなより細かい振動は、受信機の帯域不足のため生じた NDT 信号の MSK 通信方式によるボーレートによるものである。一方、高度 100 km 以上

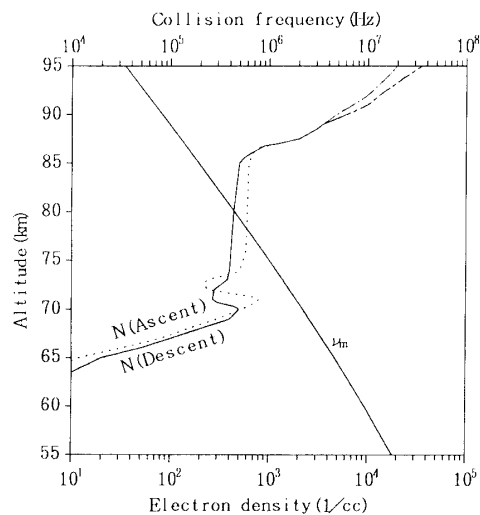
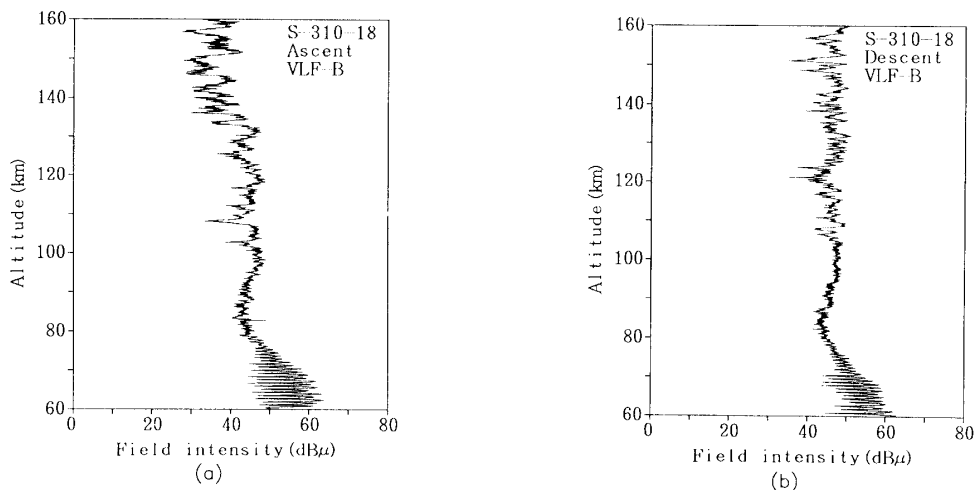


図 8 中波放送波強度分布から解析された電子密度分布

上昇時は点線，下降時は実線で表わされている。高度 90 km 以上はインピーダンスプローブにより測定されたものである。



(a) : 上昇時

(b) : 下降時

図 9(a), (b) NDT (17.4 kHz) 局の磁界強度 (Z_0H) 分布。

で生じている不規則な振動は、フェージングによるものだと考えられるが、そのメカニズムは不明である。ただ両図とも高度 100 km 以上で生じていることは興味深い。

この測定された高度 100 km 付近のホイストラモード波の強度減衰特性より電子のエネルギー依存性衝突回数が解析される。

3. 電子温度と大気温度比 (T_e/T_n) の解析

下部電離層を伝搬する地上局 VLF 波電波強度は、媒質中の電子密度及び電子と中性大気との衝突回数の濃度に依存する。従って、電子密度分布と VLF 波強度が観測されれば、衝突回数が推定できることになる。この原理に基づいて、以前 K-9 M-72 号機によって、高度 80 km から 110 km までにわたって、電子のエネルギー依存性衝突回数が測定され、更にその衝突回数から、大気圧モデルの仮定の元で、 T_e/T_n 比が推定された[8]。K-9 M-72 号機は今回と同様に、内ノ浦上空に現われる高温層の観測を目的としたもので、やはり電子温度プローブ法により高温層の出現が認められた。筆者らの方法による T_e/T_n 観測でも、E 層付近でその比が 2 程度となり、高温層の存在を傍証した。

今回、S-310-18 号機によって観測された NDT 17.4 kHz 強度と、同時搭載されたジャイロプラズマプローブ法による電子密度(宇宙研、渡辺勇三氏)を使用して、 T_e/T_n 分布が推定された。

3-1 衝突回数と T_e/T_n の関係

VLF から SW にわたる電波が電離層中を伝搬するとき、主に電子と中性大気との衝突により減衰を受ける。電子と中性粒子との衝突回数の定義は、中性粒子密度 N_n 、衝突断面積 σ 及び電子と中性粒子の相対速度 V_r とすれば、

$$\nu = N_n \sigma V_r \quad (1)$$

と表わされる。これを、波動方程式に繰り込む時、衝突断面積 σ を電子温度に関して一定であるかないかによって理論的な取り扱いが異なる。VLF 帯から MF 帯電波の下部電離層中の減衰を計算する場合、 σ を電子エネルギーの関数として考えると、より正確に減衰の計算ができることが報告されて来た[9]。この時、衝突回数はエネルギー依存性衝突回数 ν_m として表わされ、 V_e を電子の最確速度 $mV_e^2/2 = \chi T_e$ 、 χ をボルツマン定数とすると、

$$\nu_m = N_n V_e \sigma(V_e) \quad (2)$$

と表わされる。室内実験によれば、窒素分子の衝突断面積は、電子エネルギーが 0.02 から 0.01 eV の範囲で電子の速度 V_e に比例することが知られており、上式で $\sigma = \alpha V_e$ (α は比例定数) の関係を代入すれば、

$$\nu_m = \frac{P}{\chi T_n} \alpha V_e^2 = \frac{\sigma T_e}{m_e T_n} P \equiv K_m \times 10^5 P \quad (3)$$

となる。ここで、 P は中性大気の圧力である。また、 K_m は衝突比例定数と呼ばれ、 $T_e = T_n$ で σ として大気の衝突断面積の室内実験値を用いると、 $K_m = 6.3$ となる。また、 ν_m と大気

圧分布が分れば、 K_m が求められ、 T_e/T_n が推定できることになる。以下では、 ν_m を直接計算する代わりに、季節変化を考慮した大気圧分布として、CIRA 72 報告[10]を採用し、 K_m の高度分布を求める。

3-2 T_e/T_n 分布の計算

T_e/T_n 分布を推定するには、電子密度分布が既知でなければならない。それには、同時搭載の NEL によって測定された高度 90 km 以上での電子密度分布 (図 10) を用いている。磁界強度の高度分布を計算する full wave 計算法では、それより低高度の電子密度分布も必要で、それには、2.4 節で求めた高度 90 km 以下の分布 (図 8) を用いている。この高度 90 km 以下の電子密度分布は、高度 90 km 以上の VLF 強度の絶対値には影響するが、高度に対する微分値には関係がない。この観測された電子密度分布と、式(3)の K_m を色々と変化させた衝突回数分布のもとで、ロケットと NDT 送信局の位置などの full wave 計算に必要なパラメータ (表 1) を考慮して、17.4 kHz 電波について、1 km 毎の減衰率を求めた。しかし、このように K_m を変化させて計算した合成波の磁界強度は、細かく振動しており、そのため図 11 のように減衰率も大きく変動 (最大 0.4 dB/km) する。この変動による誤差をなくするため、最小二乗法により、磁界強度の計算値を平滑化し、その最小二乗式から、磁界強度の減衰率を求めた。このような方法で得られた磁界強度の減衰率と K_m との関係を高度 90 km から 110 km までの区間で、1 km 毎の各高度について求めたもの

表 1 full wave 計算に用いたパラメータ値

ジャイロ周波数 (kHz)	1210
伏角 (度)	43.0
方位角 (度)	238.0
入射角 (度)	82.7
周波数 (kHz)	17.4

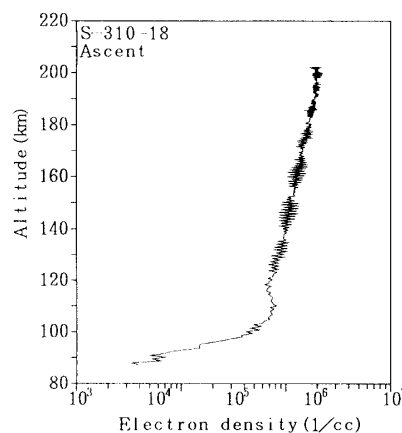


図 10 NEL で測定された電子密度分布 (宇宙研, 渡辺勇三氏提供)

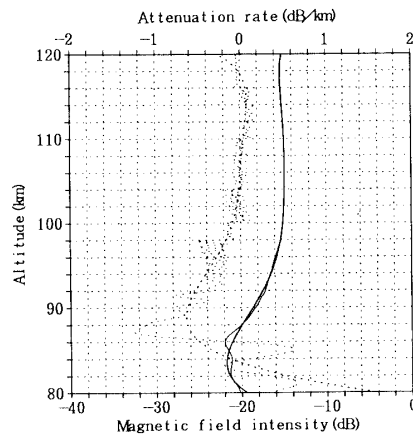


図 11 $K_m=3$ の時の強度分布及びその減衰率の計算値と、その最小二乗近似で求めたものの比較
 細実線：強度分布の計算値
 細点線：その減衰率
 太実線：計算値を多項式近似の最小二乗法で表わしたもの
 太点線：その減衰率

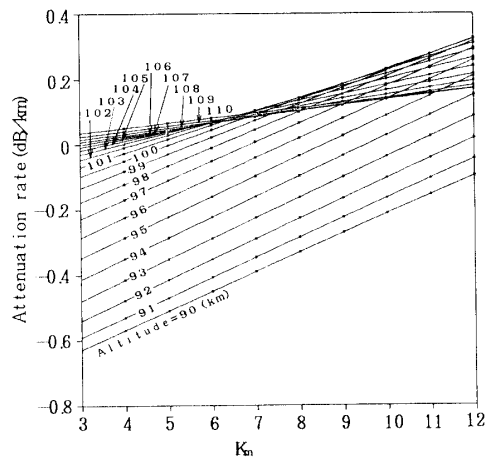


図 12 17.4 kHz の減衰率と衝突比例定数 K_m との関係

を図 12 に示す。一方、この計算値に相当する観測値は図 9 (a) であるが、観測値は、ポーレートによる小さな振動と高度 100 km 以上でのフェージングによる変化がみられ、このままでは高度に関する減衰率が得られない。そこで、帯域 3.5 Hz の 1 次 IIR 型デジタルフィルターを通し、その最大値をプロットして、16 次の多項式で最小二乗近似を行った。このようにして計算した観測値の減衰率を図 13 に示す。図 13 で求めた観測値の減衰率を図 12 の縦軸に取り、各高度での減衰率の変化との交点から K_m が一義的に求められる。その結果を図 14 に黒丸 (●) で示す。同図には、比較のため、K-9 M-72 号機で推定された

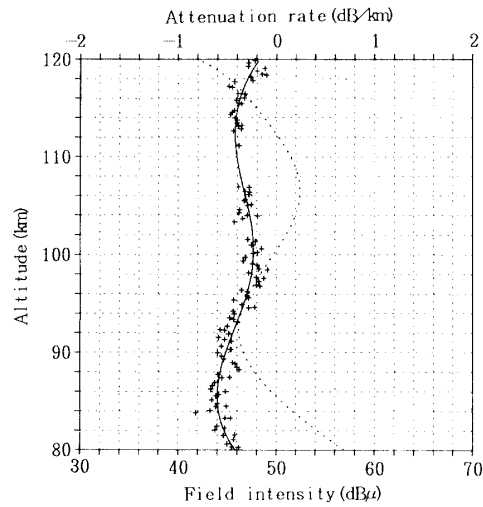


図13 17.4 kHz 観測値の高度分布及び減衰率の最小二乗法近似によるスムージング

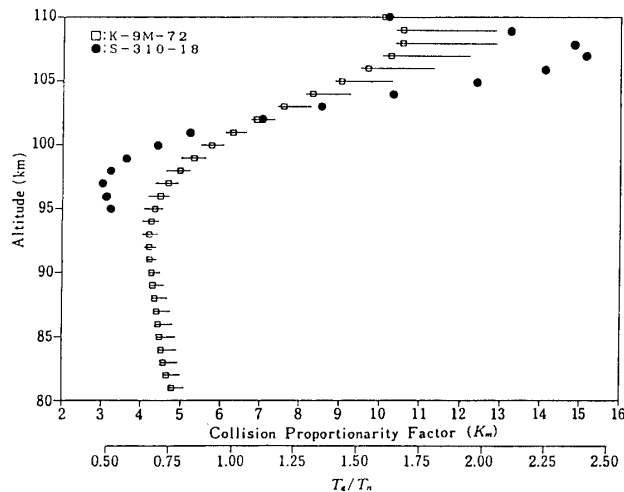


図14 電子温度と中性大気温度比 (T_e/T_n) の解析結果
比較のため K-9 M-72 号機の結果 (□印) も示す。

$K_m(T_e/T_n)$ を□印で示されている。 $T_e = T_n$ のとき、中性大気の衝突断面積の室内実験値から求めると $K_m = 6.3$ になるので、その時の値で、 $T_e/T_n = 1$ と規格した。従って、図14では、高度 90 km 以下で T_e/T_n が 1 より小さくなっているのは、 $K_m = 6.3$ で規格したため、この値が 4.3 程度ならば、 $T_e = T_n$ と見なせる。常識的には下部電離層で $T_e = T_n$ であるから、中性大気の衝突断面積の実験値を用いたところに、 T_e/T_n が 1 より小さくなった原因がある。ここで用いた $K_m = 6.3$ は一つの目安で、最近のロケット観測では K_m が 6.3 より小さい値を取ることも報告されている [11]。

S-310-18号機による結果では、高度107 km付近で T_e/T_n が約2.5と極大値を取り、高度97 kmで極小値となっている。両機の結果共、高度100 km以上で T_e/T_n の値が1より増加し、その最大値は2~2.5に達している。一方、S-310-18号機では、同時搭載された電子温度測定器(TEL)によって、電子温度が測定された。その結果によれば、高度100 kmで約600°K、さらに高度ともに上昇し、高度115 kmで約700°K、そして高度120 kmで550°Kに減少していた。これは、筆者らの結果(図14の●印)とその傾向及び電子温度の値に関してもほぼ合っていると見える。

4. ま と め

S-310-18号機ロケットは、冬期に内ノ浦の上空に出現する高電子温度層のメカニズム解明のため打ち上げられた。筆者らのグループは、このプロジェクトに関して、電波吸収法によるD層電子密度及び、電子温度と中性温度の比を求めた。D層電子密度分布はかなりの精度で測定され、高度65 kmから85 kmにわたって電子密度数が400~500個/ccのD層が見られた。一方、地上局VLF(NDT 17.4 kHz)の磁界強度分布と電子密度(NEL)の測定のもとで、エネルギー依存性電子-中性粒子の衝突回数分布から電子温度と中性大気温度の比(T_e/T_n)を求めた。その結果、高度105 km付近で、 T_e/T_n が2.4を示し、電波吸収法からも高温層の出現を示唆する観測データが得られたといえる。

なお、1988年2月に打ち上げられた“あけぼの衛星”には本ロケット実験によって性能が確認された波動計測機器(広帯域ループアンテナ、及びVIP)が搭載されていることを付記する。

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なわれたものであり、実験主任伊藤富造教授、そしてこのプロジェクトの企画責任者小山孝一郎助教授には大変お世話になりました。ここに両氏に感謝の意を表します。又、筆者らは、平素からご指導賜わり、ロケット実験をサポートして頂いている京都大学木村磐根教授、松本紘教授、に深く感謝致します。東京電機大学橋本弘蔵教授からVIP計測回路の設計について有益な助言を頂き、また、宇宙科学研究所渡辺勇三氏から電子密度分布の測定値を頂いた、ここに合わせて感謝します。

ロケット搭載装置は、明和システム株式会社の製作(ループアンテナ及びシステムアンテナは明星電気株式会社の製作)であり、特に高野博氏に負うところが大きくお礼を申し上げます。

参 考 文 献

- [1] 長野勇, 岡田敏美, 井上良彦, 牧野将美, 森田慎一郎, 満保正喜: 宇宙研報告, 特集23号, 221, (1989)
- [2] Okada, T. and Nagano, I: Trans. IEICE, in press (1990)
- [3] Nagano, I, Mambo, M. and Kimura, I.,: Planet Space Sci., 26, 219 (1978)

- [4] Okada, T., Nagano, I., Hashimoto, K., Kimura, I., Oya, H., and Morioka, A., : Trans. IEICE, **6**, 510 (1987)
- [5] 岡田敏美, 長野勇, 鶴田浩一郎 : 第 84 回 SGEPPSS 講演会, 123 (1989)
- [6] 長野勇, 満保正喜, 安田一博, 松本紘 : 宇宙研報告, **39号**, 1 (1986)
- [7] Kimura, I., Hashimoto, K., Nagano, I., Okada, T., Yamamoto, M., Yoshino, T., Matsumoto, H., Ejiri, M., and Hayashi, K. : J. G. G. in press (1990)
- [8] 長野勇, 満保正喜, 深見哲雄, 外村雅治 : 宇宙研報告, **27**, 1 (1985)
- [9] Sen, H. K. and Wyller, A. A., J. Geophys. Res., **65**; 12, 3931 (1960)
- [10] CIRA : Cospser International Reference Atmosphere, Akademie-verlag Berline (1972)
- [11] Mechtly, E. A., : Radio Sci., **9**, 373 (1974)