

K-9 M-72 号機による下部電離層中の  
衝突回数の推定\*

長野 勇\*\*・満保 正喜\*\*・深見 哲男\*\*\*・外村 雅治\*\*

(1985年5月25日受理)

Estimation of Collision Frequency in the Lower  
Ionosphere by means of K-9M-72 Rocket

By

Isamu NAGANO, Masayoshi MAMBO,  
Tetsuo FUKAMI and Masaharu TOMURA

**Abstract:** The collision frequency profile in the altitude range from 80 km to 110 km is estimated by using the simultaneous observation of a ground based VLF signal and Langmuir probe current by a rocket. The altitude profile of the right-handed circularly polarized component of the 17.4 kHz signal transmitted from Yosami near Nagoya was observed by a sounding rocket K-9M-72. The collision frequency for mono-energetic electrons in the lower ionosphere is expressed as  $\nu_m = K_m \times 10^5 P$  where the value of  $K_m$  is called collision proportionality factor.  $P$  is the atmospheric pressure and is taken from CIRA model in this paper. Analysis of the observed signal intensities is based on the generalized full wave method. As a result, the collision proportionality factor  $K_m$  was shown to be a function of altitude and varied from 4.4 to 10.5. In particular, the  $K_m$  increased rapidly at the altitude of around 100 km. This result means that the ratio of the electron temperature to the neutral temperature becomes progressively higher value from 1.0 to about 1.7 in the altitude between 100 km and 108 km.

---

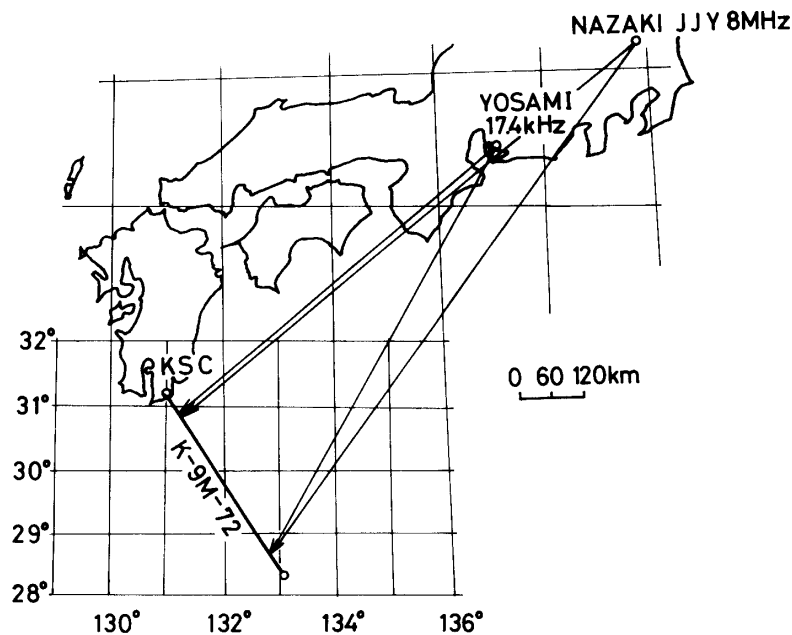
\* 宇宙研特別事業費による研究論文

\*\* 金沢大学工学部電気・情報工学科

\*\*\* 現在, 石川工業高等専門学校

### 1. ま え が き

筆者らは、下部電離層中の低電子密度 ( $N < 10^3$  個/cc) を推定できるモード減衰特性法を提案し、これまでに数回のロケット実験を行い、日没から日中における D 層の電子密度分布を明らかにしてきた[1]。初期の観測では、地上から送信された VLF 波電波をロケット上で右廻りと左廻りの成分に分離し、その強度だけを測定し、電子と中性大気衝突回数分布の仮定のもとで低電子密度を推定した[2]。しかし、全高度にわたる衝突回数分布の仮定は推定する電子密度にある程度の不明瞭さがあるため、最近では電子密度が約  $10^3$  個/cc 以上で有効とされているラングミュアプローブ法も同時に搭載し、観測した電子密度で full wave 計算を行い、観測した VLF 波強度の減衰と計算値が合うように高度 90 km 付近の衝突回数を求めた。そして、衝突回数が大気圧に比例する性質を使って下部電離層全体の衝突回数分布を決定し、低電子密度分布の測定精度を向上させた[3]。今回、K-9 M-72 号機によって観測した上昇時高度 130 km までの、ラングミュアプローブ法による電子密度分布及び地上局 17.4 kHz 電波の強度分布から前述した文献[3]の手法を一部用いて、電子の最確速度を有する電子と中性粒子の衝突回数分布 ( $\nu_m$ ) を求めた。本論文では、K-9 M-72 号機に関する実験方法、衝突回数の解析手順及び解析誤差について述べる。又、 $\nu_m$  は大気圧  $P$  に比例し、その比例定数を  $K_m$  とすれば、 $\nu_m = K_m \times 10^5 P$  と表わされる。大気圧として、CIRA 1972 の平均値モデルを用いた場合、 $K_m$  の値は、高度 80 km~95 km まで約 4.4、そして 100 km から急激に増加し 108 km で、10.5 となった。一方、室内実験から求められた酸素と窒素の衝突断面積及び電子温度と大気温度が等しい仮定のもとでは  $K_m$  は高度にかかわらず一定で、6.3 を取ることが古くから知られている[4]。高度 108 km



第1図 ロケット軌道と観測した電波通路の大地面上への射影

の  $K_m$  の値は、電子温度が中性粒子温度より約70%高いことを示唆しており、冬期内ノ浦上空、高度110 km付近に現われる高温度層を、波動観測からも確かめられた。

## 2. 実験の概要

K-9 M-72号機は冬期にかぎって内ノ浦上空、高度110 km付近に現われる高温度層に関して、ふり込み粒子のエネルギー、電子温度、微小磁場計測など9項目の測定器が搭載され、昭和57年2月11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°で発射され、発射後4分54秒で最高高度328 kmに達し、9分40秒後に内ノ浦南東約382 kmの海上に落下した。その間、すべての搭載機器は正常に動作した。又、筆者らの測定器は、名古屋付近から送信されている依佐美局17.4 kHz(放射電力200 kW)電波及び名崎から送信されているJJY 8 MHz電波を受信した。第1図は、ロケット軌道と両送信局とロケット間の電波通路を日本地図上に射影したものである。写真1は、KSC内のシールドルーム内のK-9 M-72号機搭載機器の電波環境テスト風景である。

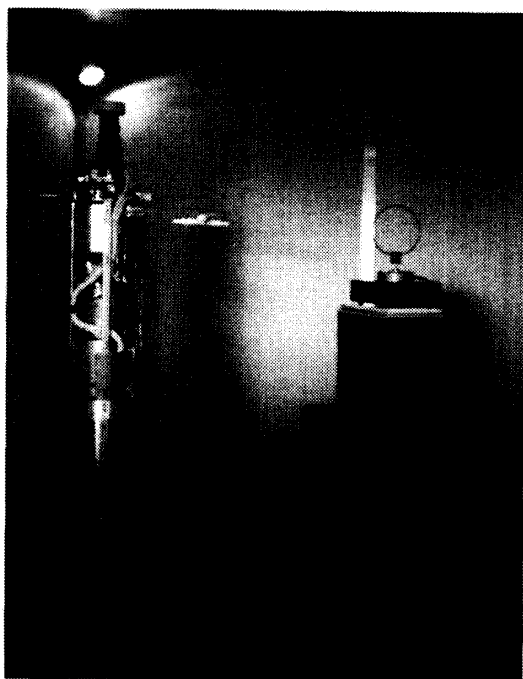
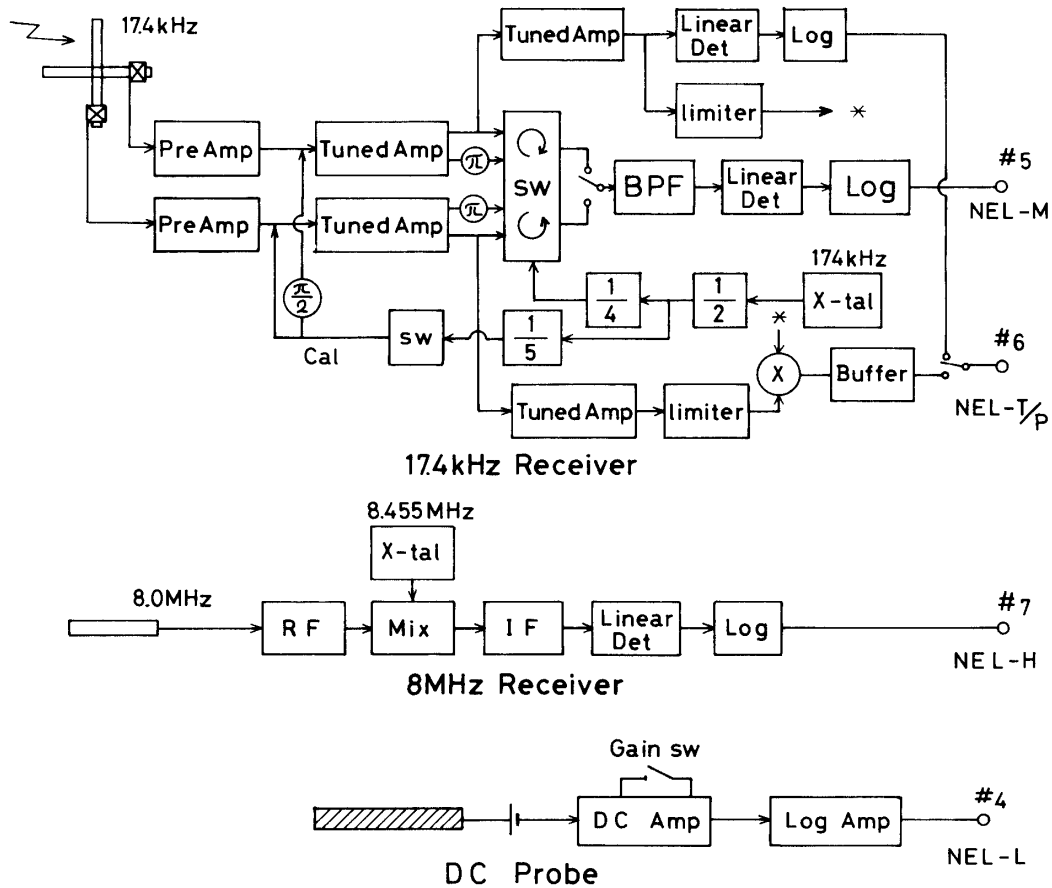


写真1 KSC シールドルーム内における17.4 kHz信号の  
K-9 M-72号機の校正及び試験風景

### 2-1 観測装置

ロケット搭載装置のブロック図を第2図に示す。VLF受信機は伝搬モードを観測するために、単なる固定周波数受信機(第2図の中)と比して、少し複雑な構成になっている。まず、17.4 kHz信号は、ロケットに垂直に突き出した直交バーアンテナ(長さ180 mm, 直径10 mmのフェライトコアに1000回のコイルを巻いている)によって受信し、その出



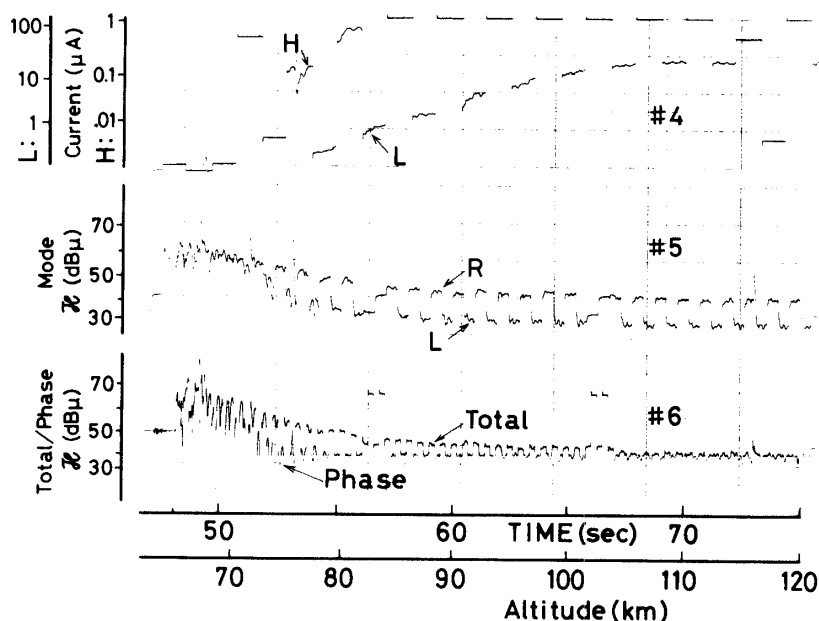
第2図 K-9 M-72号機に搭載したVLF波, JJY 8 MHz電波及び電子密度観測のためのブロックダイアグラム

力電圧を相互に約 5.5 kHz でスイッチングを行う。それは、等価的に一本のアンテナを左右の方向に回転させることに相当し、受信電波の周波数とスイッチング周波数との和と差の成分が右廻り(R)及び左廻り(L)円偏波成分となる。実際には、第2図の NEL-M 端子(#5)の系統に見られるように、相互に反対方向に回転する2個のスイッチング回路を用いて、一つの中心周波数 11.3 kHz のバンドパスで R, L 成分を分離し、テレメータチャンネルの節約のためそれらを 0.5 秒毎切替えて地上へ伝送している。又、同時に直交アンテナの位相と片方のアンテナの振幅も #6 でモニターしている。JJY 8 MHz の受信には、アルミ製のバーアンテナの突き出し機構 (200 mm) をアンテナに用いている。一方、DC プロブには、ロケット本体に対して +5.1 V が印加され、電子の流れ込みによる飽和電流を  $10^{-9}$  ~  $10^{-4}$  A の範囲で捕集している。

## 2-2 観測データ

K-9 M-72号機ロケットの発射後、47秒(高度 64 km)で開頭し、その1秒後に VLF アンテナ及び DC プロブが展伸され、観測が開始された。開頭の高度から 120 km までのテレメータ記録例を第3図に示す。同図の上から DC プロブの捕集電流、17.4 kHz 信号の

左右円偏波強度そして下にロケットのスピンの変化を受けている磁界強度及び直交アンテナ間の位相差を示している。FM テレメータによって地上へ送られたデータは、1ミリ秒毎にA/D変換され、8ビットデータとして、磁気テープに記憶されている。本論文では、すべてこのデジタルデータを使用した。



第3図 K-9 M-72号機による上昇時のTM記録例

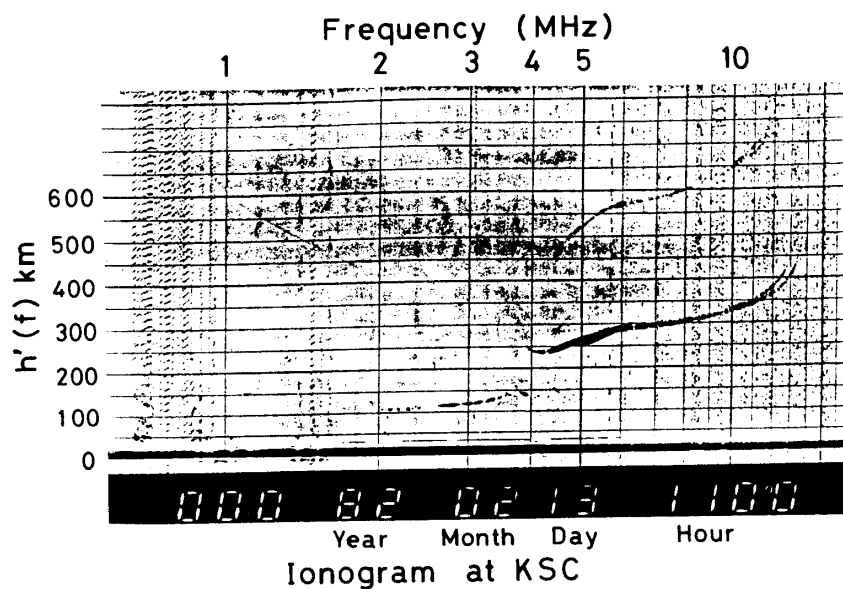
### 電子密度分布

測定に用いたプローブは半径1.5 mm、長さ190 mmの円筒形プローブで、空気中でのプローブ表面の汚染防止のためガラスで真空封じされていて、展開と同時にガラス割が行われた。これにより再現性のある安定した捕集電流が得られる[5]。プラズマ中のプローブ理論から、捕集電流をI、電子密度をNとすれば

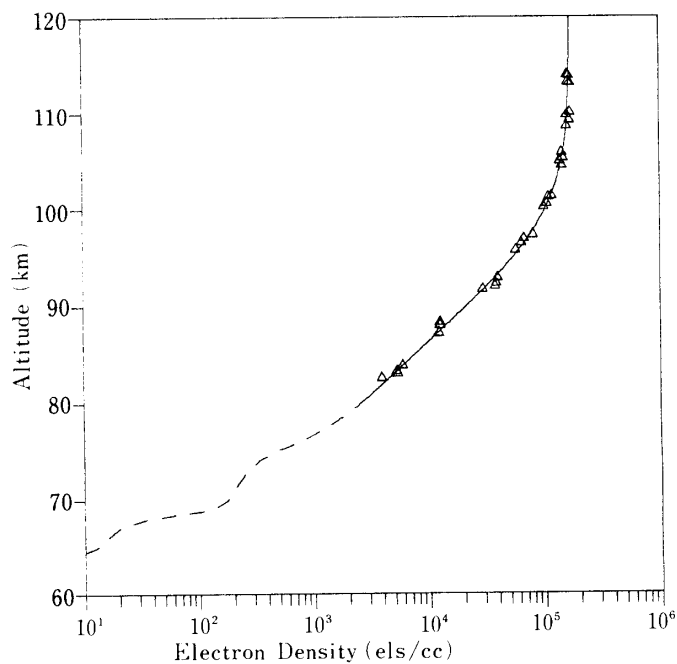
$$N = \frac{\pi}{2Se} \sqrt{\frac{2m_e}{e(V_p - V_s)}} I \quad \text{個/m}^3 \quad (1)$$

と表わされる。ここに、Sはプローブの表面積、eは電子の電荷、 $m_e$ は電子質量、 $V_p$ 、 $V_s$ はそれぞれプローブ電位とプラズマ電位である。 $V_p$ が5.1 Vと分かっているのだから、 $V_s$ が与えられれば理論的に(1)式を用いて捕集電流から電子密度が求まるのだが、(1)の導出には地球磁場[6]、衝突回数の効果[7]、及びロケット本体の影響など考慮されていないので、本論では電子密度が捕集電流に単に比例する関係だけ使い、第4図に示すように、ロケット発射後にKSCで観測したイオノグラムデータから、foE(3.7 MHz)、つまりE層の最大電子密度で規格した。電子密度は82 kmから5ミリ秒間隔で200ミリ秒間隔中の最大値を△印で、又モード減衰特性法(点線)で得られた82 km以下の電子密度[8]と滑らかに接続するように数点を選び、最小二乗法で近似した曲線を第5図に示す。ところ

で、プラズマ電位を 1.5 V と仮定した時、(1)式を直接計算した値は、イオノグラムで規格した値より、約 30%高くなっていた。ここではこれ以上言及しない。



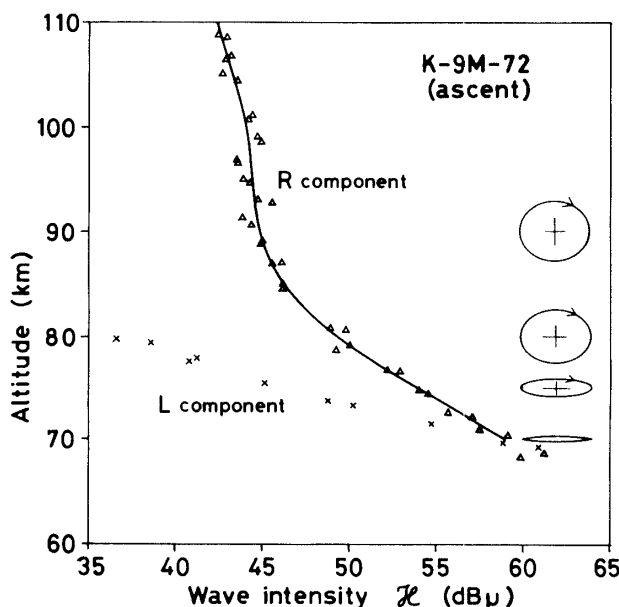
第4図 KSCで観測したK-9M-72号機発射時のイオノグラム：  
 $f_0E=3.7\text{MHz}$



第5図 DCプローブ(実線)及びモード減衰法(点線)による電子密度の高度分布

### 磁界強度分布

VLF 観測装置は打ち上げ前に標準磁界発生器により校正され、それにより、第3図の TM データから左(L),右(R)の両円偏波成分の絶対強度をプロットしたものが第6図である。△印及び×印は、R, L成分を表わし、ロケットのスピン(周期400ミリ秒)の影響を除くために、電子密度と同様に、5ミリ秒毎にサンプリングした200ミリ秒間の最大値を取った。又、曲線はそれらの最大値を最小二乗法で10次式に近似されている。バーアンテナは、17.4 kHzの磁界強度成分を測定したものであるが、それに自由空間のインピーダンス( $120\pi$ )を掛けて電界強度に換算してある。又、0 dBは発射時におけるKSC内の地上での観測値である。過去数回の地上局VLF波のロケット観測でも見られたように[2]、左廻り円偏波(L)成分は高度70~80 km間で急激に減衰している。L成分の急峻に減衰し始める高度は、 $X$ をプラズマ周波数と信号周波数の二乗の比、 $Y$ をジャイロ周波数と信号周波数の比、及び $\theta_i$ を入射角とすれば、 $X \approx Y \cos \theta_i$ の関係を満たしている[9]。つまり、VLF波伝搬のLモードの反射点に相当している。高度80 km以上では、右廻り円偏波成分だけとなっている。一方、直交アンテナ間の位相と片方のアンテナの振幅が#6(第3図)のチャンネルで得られているので、ロケットのスピンによる振幅の変化を利用して水平面内の偏波特性が計算できる。それらの様子を第6図の右側に描いた。図を見ると高度が上昇するにつれて直線偏波から地球磁場の方向(天から地)から見て右廻りの円偏波に変わっている。これは、自由空間中の電磁波モード(TE, TM)からプラズマ中のホイストラモードに結合している様子を示している。又、L, R分離観測装置が正しく動作していることも



第6図 17.4 kHz 信号の左・右両偏波 (L, R) 強度の高度分布, 実線は最小二乗法による近似式で補間されている。又, 右端に偏波の様子が示されている

示している。JJY 8 MHz の電界強度は D 層中の吸収を見るために測定されたものであるが、ロケットまでの多重伝搬路のためなどで高度 100 km までに顕著な減衰がなかった。

本論文では、以下に VLF 波の伝搬モードの明らかになったホイストラ波 (R 成分) の振幅の高度変化と同時計測の電子密度分布の最小二乗近似による連続データから衝突回数分布を推定する。

### 3. 衝突回数の推定方法

#### 3-1 衝突回数の定義

電離層中における VLF から SW 帯にわたる電波は弱電離プラズマを構成している電子と中性粒子およびイオンと中性粒子の衝突回数によって減衰を受ける。その定義はプラズマ媒質の基本的な物理量、つまり中性粒子密度  $N_n$ 、衝突断面積  $\sigma$  及び電子と中性粒子の相対速度  $V_r$  によって

$$\nu = N_n \sigma V_r \quad (2)$$

と表わされる。しかし、波動方程式に衝突効果をくり込むには粒子の運動方程式を記述する方法によって、2つの異なった定義がなされている。1つは、プラズマをコールド近似して取り扱う Appleton-Hartree (A-H) 公式に用いられている平均衝突回数  $\bar{\nu}$  であり、他は統計的取り扱いによる一般磁気イオン化理論 (Generalized magnetoionic theory) で定義されている最確速度の電子の衝突回数  $\nu_m$  である。(2)式より、

$$\nu_m = N_n V_e \sigma(V_e) \quad (3)$$

と表わせる。ここに、 $V_e$  は電子の最確速度で  $m V_e^2 / 2 = \kappa T_e$  の関係にあり、 $\kappa$  は Boltzmann 定数、 $T_e$  は電子温度である。

大気を構成している分子の速度依存性運動量伝達断面積が測定されて以来[10]、具体的に、一般磁気イオン化理論で(3)式が評価できるようになった[11]。その結果によれば、 $\bar{\nu}$  は  $\nu_m$  と電波周波数及びジャイロ周波数の大小関係により、 $\nu_m$  とそれぞれ異なった定数倍とみなしてもよいことが明らかになった。この時、 $\bar{\nu}$  は統計的な平均の意味はなく、実効衝突回数 (effective collision frequency)  $\nu_{\text{eff}}$  と呼んでいる。しかし、下部電離層中の VLF 伝搬データの解析に、 $\nu_{\text{eff}}$  を適用する場合、必ずしも  $\nu_{\text{eff}}$  と  $\nu_m$  は簡単な関係式で表されない[12]。それ故、電波の減衰から衝突回数を推定する場合、 $\nu_{\text{eff}}$  と  $\nu_m$  の関係が明らかである場合を除いて、一般磁気イオン化理論の  $\nu_m$  が用いられている。この場合、窒素分子の衝突断面積は、電子のエネルギーが 0.02 から 0.1 eV の範囲で電子の速度  $V_e$  に比例することが室内実験から得られている[13]。又、鹿児島における6回のロケット実験でプローブによって観測された電子のエネルギーは、高度 110 km 以下で上記の範囲にあり[14]、衝突断面積を  $\sigma = \alpha V_e$  と置くことにすると(3)式は、

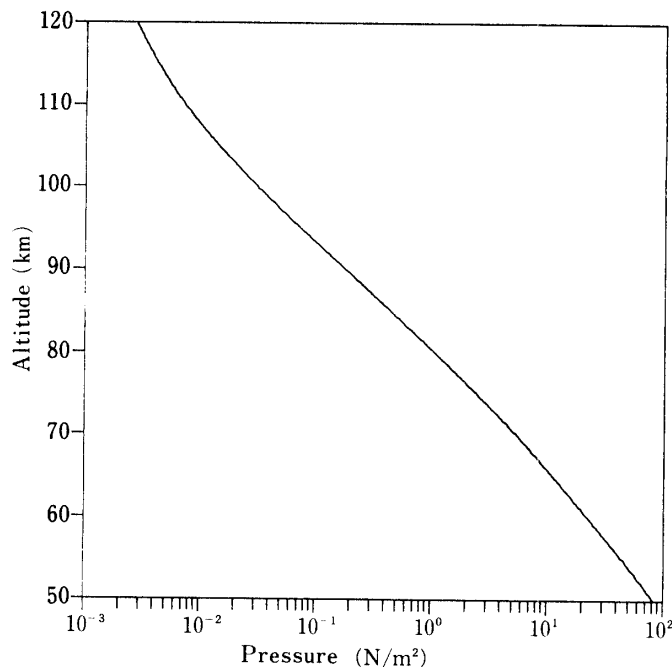
$$\nu_m = \frac{P}{\kappa T_n} \quad \alpha V_e^2 = \frac{\alpha T_e}{m_e T_n} P \quad (4)$$



と表わされる。ここに  $P$ ,  $T_n$  はそれぞれ中性大気の圧力及び温度である。もし,  $T_e = T_n$  ならば(4)式は

$$\nu_m = K_m \times 10^5 P \quad (5)$$

とおくことができる。ここに  $K_m$  は衝突比例定数 (collision proportionality factor) と呼ばれている。下部電離層中の大気は窒素と酸素により構成されているので室内実験より得られたそれぞれの運動量伝達面積を(4)式に代入すれば, 理論的に  $K_m$  が 6.3 となる[4]。従って, 大気圧の高度分布が知れば, (5)式より衝突回数が計算できる。本論文では,  $\nu_m$  を直接求める代わりに, CIRA 72 報告[15]を参照し, 平均大気圧分布(第7図)を採用し  $K_m$  を未知数として以下に考察する。



第7図 CIRA 72 から採用した平均大気圧モデルの高度分布

### 3-2 $K_m$ の計算手順

第8図に衝突比例定数  $K_m$  を求める概念的なフローチャートを示す。適当な  $K_m$  の値を(5)式に代入し, 衝突回数  $\nu_m$  と観測した電子密度分布を使って, 一般磁気イオン化理論から導出された磁化マトリックス[16]をくり込んだ full wave 計算により, 磁界の  $\mathcal{H}_x, \mathcal{H}_y$  成分を計算する。そして, 右廻り円偏波成分は次式を使って合成される。

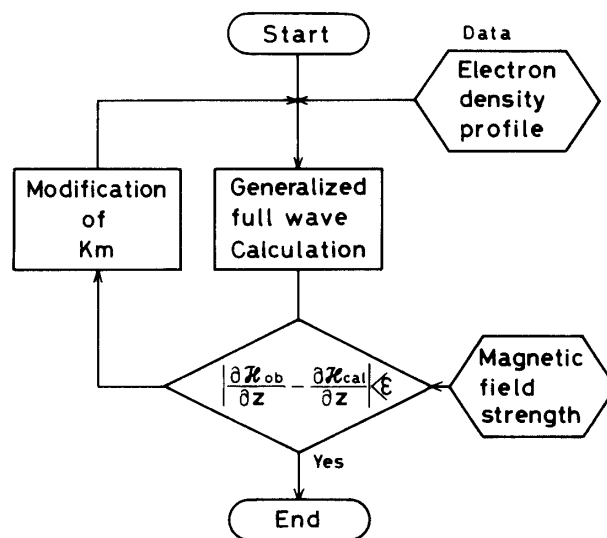
$$\mathcal{H}^{L,R} = \frac{1}{2} (|\mathcal{H}_x|^2 + |\mathcal{H}_y|^2 \mp 2|\mathcal{H}_x||\mathcal{H}_y| \sin \phi)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

ここに, +, - 符号はそれぞれ  $R, L$  成分に対応する。又,  $\phi$  は磁界の  $x, y$  成分の位相差であ

る。この時、DCプローブで観測されていない高度80 km以下の電子密度分布は、左廻り円偏波成分(L)の急峻な減衰曲線に合うように決める。この下部の電子密度のあいまいさはR成分の絶対強度に影響を与えるが、その高度に対する変化には関係しない。又、full wave計算に用いるパラメータは電波の反射点(L成分の急峻に減衰する高度、第6図では70 kmに相当)、NDTの送信点(34°36'N, 137°01'E)及び受信点分かっているため地理的關係により、容易に求めることができる。K-9 M-72号機の飛しょうに伴ないパラメータは多少変化するが、上昇時高度100 kmにおけるパラメータ値を代表値として用いた。このとき、電波の入射角、方位角はそれぞれ81°及び北から東廻りに121°となる。なお、受信点を高度80 km及び110 kmとしたときのパラメータ値の違いによる推定結果への影響は後述する。パラメータが決まれば、(6)式より、ある $K_m$ の値で、計算値のR成分の高度減衰率(Attenuation rate)が求められ、観測値のそれと比較してそれらが一致する時正しい $K_m$ が求められることになる。実際には、 $K_m$ を3.0から12.0まで変化させ高度80~110 kmの区間を1 km毎に小区間に分け、その間の減衰量を求めた。第9図に高度をパラメータとして縦軸にR成分の減衰率、横軸に $K_m$ を変化させた時の計算値を実線にて示す。従って、第6図の最小二乗法によって近似された磁界強度から、その微係数を縦軸にとり実線との交点から $K_m$ が一義的に決定される。

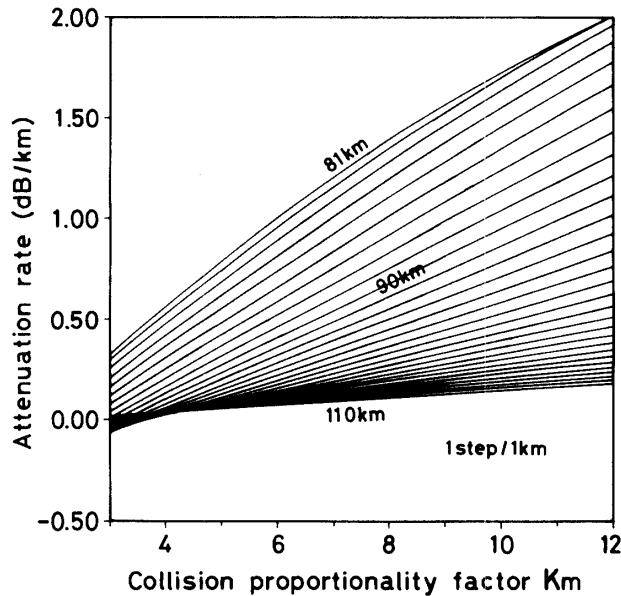
#### 4. 推定結果と考察

第10図に得られた $K_m$ (□印)及びそれらを(5)式に代入して求めた衝突回数 $\nu_m$ (実線)の値を示す。プロットした点は、高度区間1 kmの平均値であるからその中点高度で代表した。



Flow chart of estimating the collision proportionality factor  $K_m$

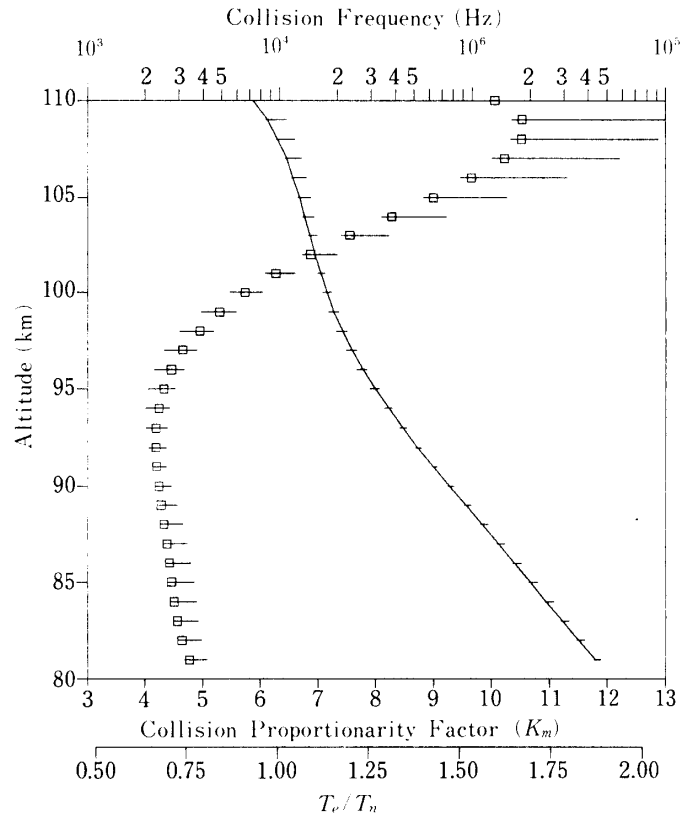
第8図 衝突比例定数を求めるための概念的フローチャート



第9図 高度各1 km 区間をパラメータとして  $K_m$  を変化した時の R 成分減衰率

衝突回数を推定する際に生ずる誤差の要因として、(1)磁界強度測定値から減衰率を求める操作及び(2)磁界強度を計算するためのモデル及びパラメータの誤差が考えられる。(1)では、測定した磁界強度分布を最小二乗法により10次式に近似し減衰率を求めたが、9次及び11次近似した場合に、10次式に比して得られる衝突回数の違いをもって誤差評価を考える。11次式を用いた場合は、全高度にわたって1%以下であったが、9次式では-5.8から+22%まで変化した。特に、105 km以上でその影響が大きかった。一方、(2)では更に(イ)；受信波を直接波と1回反射波の合成と考えると、伝搬経路長の違いや電離層反射による、減衰、位相の変化を考慮した場合と、直接波だけの場合との違いは、+1.2から+5.5%であった。又、(ロ)；ロケットの飛しょうに伴う full wave パラメータの変化が推定結果に与える影響は、各パラメータ値を用いた場合と100 kmのパラメータ値を用いた場合を比較すると、ジャイロ周波数については、-0.9から+2.1%、伏角、方位角、入射角については、1%以下であった。以上のように(1)による誤差が(2)の(イ)、(ロ)のそれぞれによる誤差よりも大きく、(2)の(イ)において反射波を考慮したり、(ロ)においてロケットの位置に対応して地理的条件を変化させることは、計算の複雑さに対して推定精度の向上が小さいと言える。推定精度の目安の表現として、各高度で(1)及び(2)による誤差について正及び負のそれぞれの和を最大誤差範囲と考え、第10図のエラーバーで表わした。

第10図を見て明らかなように、衝突比例定数  $K_m$  は高度80 kmから95 kmまでほぼ一定で95 km以上で急激に増加している。一方、MechtlyはHF帯の電波を利用して電波吸収法とファラデー回転法を共用して  $\nu_m$  を測定する実験を数十回行っている[18]。彼の結果は、CIRA 62(その後改良してCIRA 72となる)から大気圧を参照し、衝突比例定数を



第10図 衝突比例定数  $K_m$  (□), 電子温度と中性粒子温度の比 ( $T_e/T_n$ ), 及び衝突回数 (実線) の高度分布

求め、それを最小二乗近似により、高度の一次直線に表わすと  $K_m = -4.6 + 0.13h$  となった。ここに  $h$  は高度で km で表わす。これは本論文の値と一致しないが傾向は似ている。又、最近では  $K_m$  が  $T_e$  の関数で 6.4~7.1 の範囲で変化するが、この値は高緯度地方のロケット観測値と大変によく合うとも報告されている [19]。しかし、筆者らが行った K-9 M-53 号機の解析でもやはり高度 100 km を境として  $K_m$  が 4~11 と大きく変化した [20]。

高度 95 km 以下では、電子と中性大気の衝突回数が非常に大きいから、電子温度と中性大気温度は等しいと考えられる。すると、(4)、(5)式で述べたように、大気分子の運動量伝達断面積が電子の速度に比例するならば、 $K_m$  は理論的に 6.3 となる。しかし、K-9 M-72 号機の結果では、高度 80~95 km では  $K_m$  は 4.4 程度となっている。この矛盾を説明するには、(1)CIRA 72 のモデルがロケット近傍のそれより約 40% 高いか、(2)大気分子の運動量伝達断面積に、電子速度に依存しない項が含まれているか、つまり、酸素分子及び酸素原子の組成率が増加したため、その総合の運動量断面積が、 $\sigma = c + \alpha V$  となる場合が考えられる。この場合、 $\sigma$  に定数が含まれることにより、電波の吸収が少なくなる傾向にあり、 $K_m$  が低高度で増加することになる。しかし、これについては、今後更に詳しく検討する必要がある。(4)式に見られるように  $K_m$  は電子温度と中性粒子温度の比 ( $T_e/T_n$ ) に比例するので室内実験から得られた  $K_m = 6.3$  の値を使って第10図の  $K_m$  の推定値を  $T_e/T_n$

で見ると、 $x$  軸の下段のスケールとなる。高度 100 km から  $T_e$  が  $T_n$  より大きくなり、高度 108 km で  $T_e/T_n$  が約 1.7 位となっている。更に、高度 95 km 以下で  $T_e = T_n$  を仮定すれば我々のデータから高度 108 km で  $T_e/T_n$  が 2.4 にもなる。高度 80 km から 95 km において  $T_e/T_n$  が 1 より少し小さいのは上述の(1)、(2)の理由のためで検討を要するが、少なくとも 100 km 以上で電子温度が中性粒子温度より高いと言えるであろう。

## 5. ま と め

K-9 M-72 号機実験において、観測した地上局 17.4 kHz 信号の右廻り円偏波強度及び DC プローブによる電子密度の両データから、generalized full wave 計算を使って、下部電離層中のエネルギー依存性衝突回数  $\nu_m$  を解析した。そして、電子温度と中性大気温度比の分布も推定した。結果を要約すると以下ようになる。

- (1) 衝突比例定数  $K_m$  は、高度の関数で 4.4~10.5 の値に変化した。
- (2) K-9 M-72 号機では、高度 95 km 付近で  $K_m$  が急激に上昇し高度 108 km 付近で最大値に達している。これは、 $T_e$  が  $T_n$  より少なくとも約 70% 高いと説明がつく。電波による衝突回数の測定により電子温度と中性大気温度の比を推定したことは、内ノ浦のロケット実験で初めてであり、冬期に現われる高温層の出現をサポートする傍証となろう。

又、下部電離層中の VLF 電波伝搬における電波吸収の解析には、 $K_m$  は 6.3 の一定値が多く研究者によって用いられている。我々の実験結果では、必ずしも高度に関して一定でない結果が得られたので、今後大気圧として CIRA モデルを採用した衝突回数  $\nu_m$  分布を使用して、電離層による電波吸収の解析をする場合には注意が必要であろう。

## 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、特に実験主任平尾邦雄教授に大変にお世話になりました。そして、同研究所小山孝一郎、向井利典の両氏に、ガラス封印リングミュアープローブを提供していただいた。ここに合せて感謝の意を表します。又、筆者らは平素からご指導賜わりこのロケット実験をサポートして下さっている、京都大学木村磐根教授に深く感謝を表わします。搭載装置は、明星電気の製作であり、新美義博氏に負うところが大きく感謝致します。データ整理及び図面のトレースなどを手伝っていただいた本学森田慎一郎技官にお礼を申しのべる。

## 参 考 文 献

- [1] Nagano, I. Mambo, M. and Kimura, I., Planet. Space Sci., **26**, 219 (1978)
- [2] Nagano, I. Mambo, M. and Kimura, I., IECE of Japan, **E59**, 8, 6 (1976)
- [3] 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)
- [4] Thrane, E. V. and Piggott, W. R., J. Atmos. Terr. Phys., **28**, 721 (1966)
- [5] Oyama, K. and Hirao, K., Planet. Space Sci., **24**, 84 (1976)
- [6] Lafranboise, J. G. and Rubinstein, Phys Fluids, **19**, 12 (1976)
- [7] Szusyczevicy, E. P., J. Geophys Res., **79**, 1084 (1974)

- [ 8 ] 長野勇, 満保正喜, 深見哲男, 森田慎一郎, 信学全国大会 667, 昭 58 年
- [ 9 ] Budden, K. G. "Radio wave in the ionosphere", Cambridge Univ. Press (1966)
- [10] Phelps, A. V. and Pack, J. L., Phys. Rev. Letters, **3**, 340 (1959)
- [11] Sen, H. K. and Wyller, A. A., J. Geophys. Res., **65**, 12, 3931 (1960)
- [12] Budden, K. G., Radio Sci., **69**, 2, 191 (1965)
- [13] Banks, P., Planet. Space Sci., **14**, 1085 (1966)
- [14] Oyama, K., I. Hirao, K. Banks, P. M. and Williamson, P. R., Planet. Space Sci., **28** (1980)
- [15] CIRA : Cospser International Reference Atmosphere Akademie-verlag Berline, (1972)
- [16] Deek, D. G., J. Atmos. Terr. Phys., **28**, 839 (1966)
- [17] Nagano, I. Mambo, M. and Hutatsuishi, G., Radio Sci., **10**, 6, 611 (1975)
- [18] Mechtly, E. A., Radio Sci., **9**, 373 (1974)
- [19] Friedrich, M. and Torkar, K. M., J. Atmos. Terr. Phys., **45**, 267 (1983)
- [20] Nagano, I. Mambo, M. and Kimura, I., J. Geomag. Geoelectr., **34**, 27 (1982)