

# インピーダンスプローブによるイオン組成の 遷移層高度の観測

渡辺勇三・大林辰蔵

The transition height of the ion composition  
observed by the impedance probe

By

YUZO WATANABE and Tatsuzo OBAYASHI

**Abstract:** The ion sheath thickness surrounding the probe immersed in the space plasma was measured by the impedance probe using the K-9M-54 and 55 rockets. The height distribution of the ratio of the sheath thickness to the Debye length was found to be about 0.7~2.4 with its abrupt change at the height of 150~160 km. Since the capacitance of the ion sheath is affected by the ion species being present, this abrupt change is interpreted to be due to the transition of the ion composition. The dominant ion in the ionosphere is  $\text{NO}^+$  or  $\text{O}_2^+$  below the transition height and  $\text{O}^+$  above that. The estimated ion transition height is in agreement with the experimental results of the ion composition measured by the mass-spectrometer on board the K-10-12 rocket. The transition height by the impedance probe also agrees with the height of the frequency change of LHR emissions observed by the K-9M-41 sounding rocket.

## 概 要

K-9M-54号機、及び、55号機に搭載されたインピーダンスプローブによって測定されたシース容量値からシースの厚さが求められて、領域のデバイ長との比が計算され、その高度分布が詳細に検討された結果、次のようなことが明らかになった。

- (1) シース厚とデバイ長の比はこれまでに報告されている値に近く、0.7から2.4の値であった。
- (11) シース厚とデバイ長の比は160 km 附近で明確な負の勾配の高度変化を示した。

この負の勾配の生じる高度はイオン組成の遷移層高度を与えるものであると解釈される。すなわち、この高度領域を境にして電離層の主要イオンが $\text{NO}^+$ 、 $\text{O}_2^+$ から $\text{O}^+$ へ移っていくと考えられる。今回得られたイオン組成の遷移層高度は、K-10-12号機によって観測されたイオン組成の高度分布から求めた遷移層高度に近い値であった。また、K-9M-41号機によって測定された低域ハイブリ

ッド共鳴周波数から求められたイオン組成の高度変化にも良く一致した。

## 1. 緒言

インピーダンスプローブはプラズマ中に置かれた金属製プローブの等価容量値の周波数依存性が電子密度によって変化する特性を利用したプラズマ測定装置である。測定された高域ハイブリッド共鳴周波数からはプラズマ中の電子密度が高精度で求められる [1]。また、ジャイロ周波数より低い周波数での測定値はプローブの囲りに形成されるイオンシースの等価的な容量値を与える。プローブの形状を考慮に入れると、シース容量値からシースの等価的な厚さを求めることができる。この値は、これまでのロケット実験及び室内実験の結果、並びに、理論的な研究の結果から、ほぼ、デバイ長の1～5倍であることが知られている。 [2] 測定されたシースの厚さの値はプローブのフローティング電位とプローブ自身の Wake の情報を持っている。これらはイオンと電子の質量、温度、密度、及び、プローブの速度と形状によって定まる。従って、シース容量値からイオンの情報を得ることができる。事実、昼間の電離層では約160kmを境にして、主要イオンがNO<sup>+</sup>、O<sub>2</sub><sup>+</sup>からO<sup>+</sup>へ変化する、いわゆる、遷移領域が存在する。このイオン組成の遷移層高度を境界として、シース構造はイオンの変化に従って、変化していることが考えられる。本報告では、K-9 M-54号機と55号機で測定されたシース容量値を用いて、シースの厚さと領域のデバイ長の比の高度分布に関して詳細な考察を試み、イオン組成の遷移層高度の測定の可否について調べようとするものである。

## 2. 測定方法

プラズマ中に置かれた円筒形プローブ（長さ： $L$ ，半径： $a$ ）の周囲に形成されるイオンシースの等価容量値 ( $cs$ ) は、シース内を真空と仮定し、シースの厚さを  $s$  とした時、次の式で表わされる。

$$cs = \frac{2\pi\epsilon_0 \cdot L}{\ln \frac{a+s}{a}} \quad (1)$$

ここで、 $\epsilon_0 = 8.854$  (pF/m)， $\pi = 3.14$  従って、測定された  $cs$  から  $s$  を求められる。

インピーダンスプローブで測定される高域ハイブリッド共鳴周波数 ( $f_{\text{UHR}}$ ) は、衝突周波数が0の場合、次の理論式で表わされる [1]。

$$f_{\text{UHR}}^2 = f_{\text{P}}^2 + f_{\text{H}}^2 \quad (2)$$

ここで、

$$f_{\text{P}}^2 = \frac{N_e e^2}{4\pi^2 m \epsilon_0}, \quad f_{\text{H}} = \frac{eB}{2\pi m}$$

$$e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ (C)}, \quad m = 9.1 \times 10^{-31} \text{ (kg)}$$

$f_p, f_H, N_e$ , 及び,  $B$  はそれぞれ, プラズマ周波数, ジャイロ周波数, 電子密度, 及び, 磁場の強さを表わす.  $B$  は International Geomagnetic Reference Field の値を用いる. 従って, 測定された  $f_{UHR}$  から  $f_p$  が求められ,  $f_p$  から  $N_e$  が計算される.

ロケット搭載用電子温度プローブ [3] はプラズマのラングミュア特性を利用した電子温度 ( $T_e$ ) の測定装置である. 測定された  $T_e$  と  $N_e$  を用いてデバイ長 ( $\lambda_D$ ) を求められる.

$$\lambda_D^2 = \frac{\epsilon_0 k T_e}{N_e e^2} \quad (3)$$

ここで,  $k = 1.38 \times 10^{-23}$  (J/°K)

ここでは, シースの等価的な厚さとデバイ長の比, すなわち,  $s/\lambda_D$  の高度分布の考察が試みられる.

### 3. 観測結果

K-9 M-54号機, 及び, 55号機に搭載されたインピーダンスプローブと電子温度プローブは正常に動作して, シース容量値, 電子密度, 及び, 電子温度の測定を行なった. 第1表に, 両号機の実験年月日, 時刻, 太陽天頂角( $x$ ), 地磁気活動度 ( $K_p$ ), 太陽フラックス [2800 MHz] ( $S_a$ ), 太陽黒点数 ( $R_z$ ), 並びに, ロケットの飛行データをまとめて掲げる.

第1表

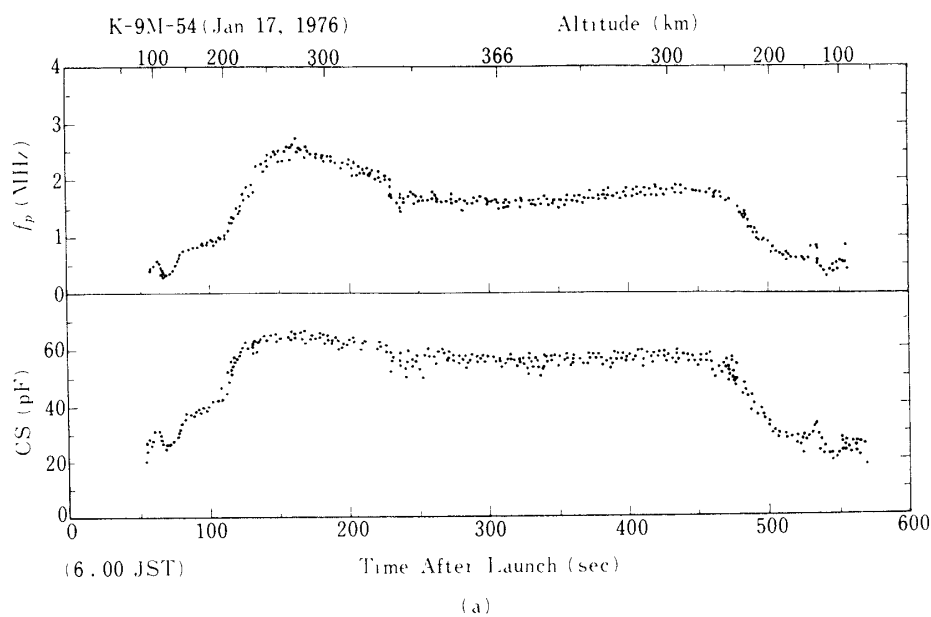
ロケット	年月日	時刻 L.T.	$x$	kp	$S_a$	$R_z$	最高々度	到達距離
K-9 M-54	Jan. 17. 1976	06:00	105°	4 <sup>-</sup>	76.6	24	366 km	300 km
K-9 M-55	Sep. 16. 1976	11:00	34°	2 <sup>+</sup>	75.8	14	359 km	433 km

第1図(a), (b)は, 観測されたシース容量値とプラズマ周波数を飛行時刻に対してプロットしたものである. シース容量値はプラズマ周波数と良く似た形になっている. 第2図(a), (b)は, 電子温度プローブ, 及び, ラングミュアプローブによって測定された電子温度の高度分布である. (a)図の点線部分は内挿したものである. 第3図は, シースの厚さとデバイ長の比の高度分布である. 丸印は観測値, 実線は,  $s/\lambda_D$  が 0.72, 0.91, 1.9, 及び, 2.41 の場合を表わしている. K-9 M-54号機の場合, 170 km 以上で 0.72, 150 km 以下で 0.91 となっており, 150 km から 170 km の領域で負の傾斜の高度変化をしている. 55号機の場合も同様の高度分布を示し, 170 km 以上で 1.9, 130 km 以下で 2.41, 負の勾配部分が 40 km となっている. これから次のことがわかる.

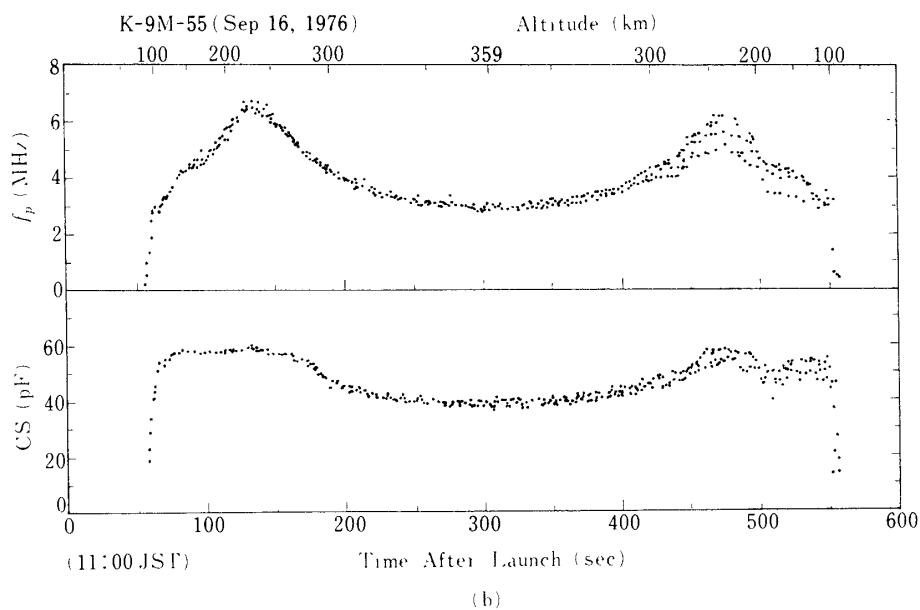
- (i)  $s/\lambda_D$  の値はこれまでの報告と大差のない値となっている.
- (ii) 両機とも, 150 km ~ 160 km 附近で顕著な負の勾配の高度変化をしている.

### 4. 検 討

第3図に掲げたシースの厚さとデバイ長の比の高度分布における 160 km 附近の負の特性領域に関して考察を試みる.



(a)

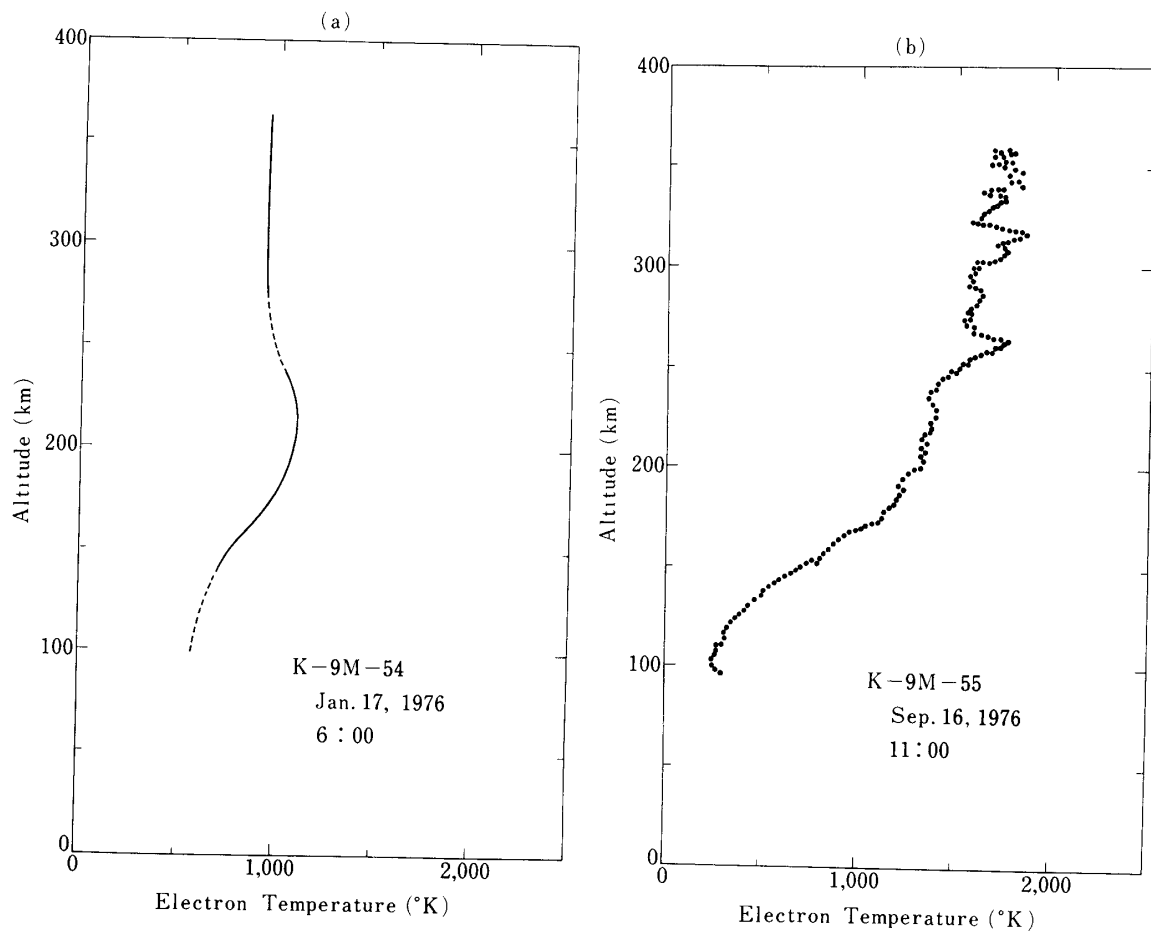


(b)

第1図 CS及び $f_p$ の測定結果

#### 4.1

この高度領域では、電子密度、電子温度、デバイ長、ロケットの速度、飛翔姿勢、及び、プローブの形状、並びに、その表面の状態に関して、特に急な変化はないものと考えられる。この高度で変化のあるものとしては、イオンの種類の変化が考えられる。すなわち、領域の主要イオンが $\text{NO}^+$ 、 $\text{O}_2^+$ から $\text{O}^+$ へ変化していく高度がほぼこの附近である。インピーダ

第2図 電子温度 ( $T_e$ ) の高度分布

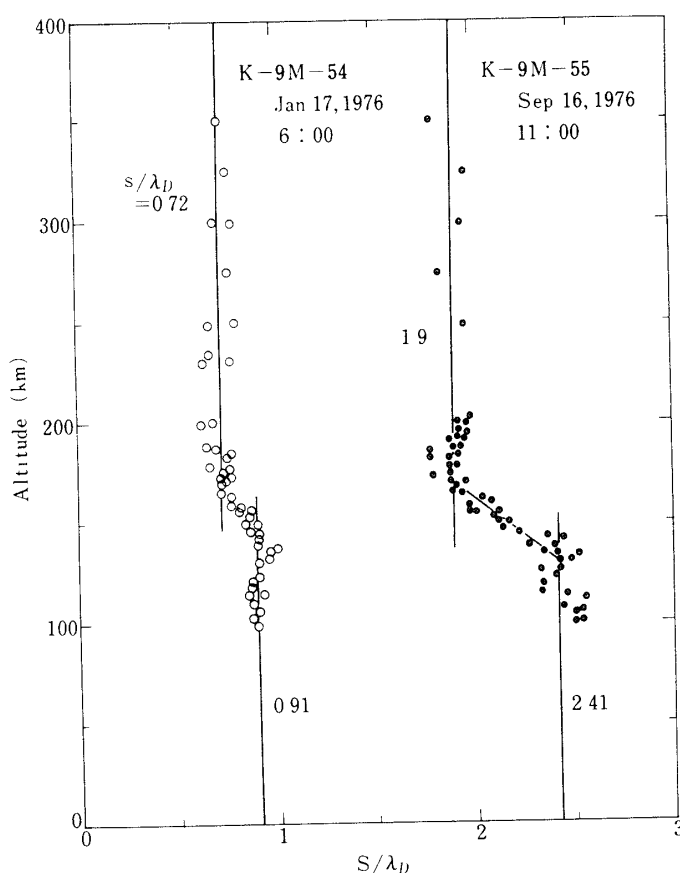
ンスプローブにおいて、イオンの種類の変化に基づいて生じる現象として次の二つのことが考えられる。

- (i) イオンの種類によりプローブの電位が変わり、それに従って、シース厚が変化する [4]。イオンの質量が大きくなると、その熱運動速度は小さくなり、プローブへの電子の附着が相対的に多くなって、プローブ電位は負に沈み、シースは厚くなる。
- (ii) イオンの種類の変化により、プローブの後に生じるプローブ自身の Wake の拡がり方が異ってくる [5]。イオンの質量が大きい時、Wake の拡がりは大きくなり、シース厚の大きい部分が増して、全体として、シース厚は大きく測定される。

上述の二つのイオンに関する現象は160km 附近の負の勾配を定性的に説明することが可能である。従って、160 km 附近の負の傾斜部分はイオン組成の遷移領域を表わしているものと解釈される。

#### 4.2

第4図は、K-10-12号機に搭載された四重極型質量分析計によって観測されたイオン密度の高度分布である [6]。電子ビーム実験とナトリウム弾、及び、セシウム弾を用いた



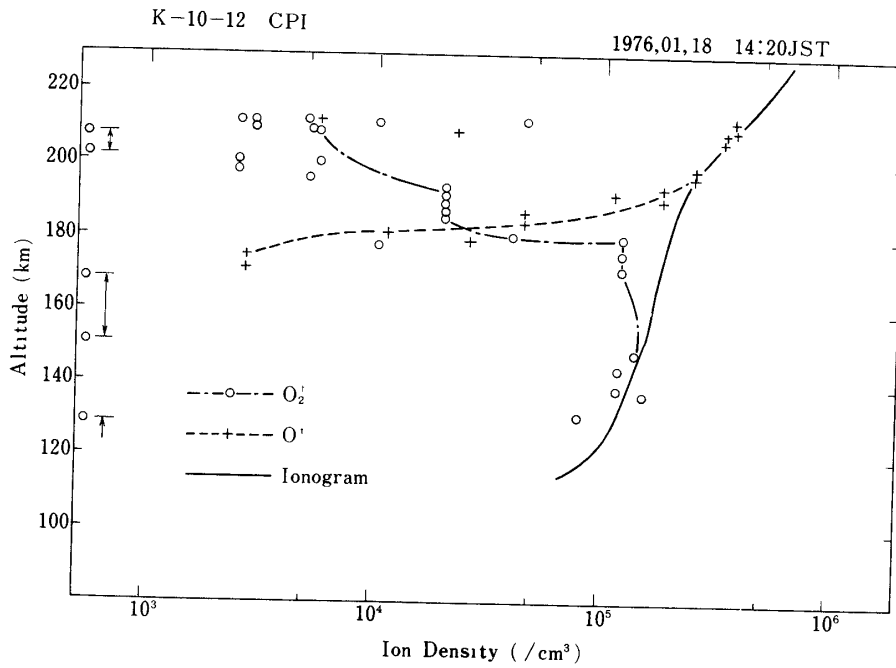
第3図 シース厚/デバイ長の高度分布  
(K-9M-54号機, 及び, 55号機)

発光雲実験が同時に行なわれたために、観測できていない高度領域もあるが、160 km から 190 km にかけてイオン組成が変化していく様子が明確にわかる。この実験は、K-9M-54号機の実験日の翌日の14時20分(J.S.T)に行なわれたものである。

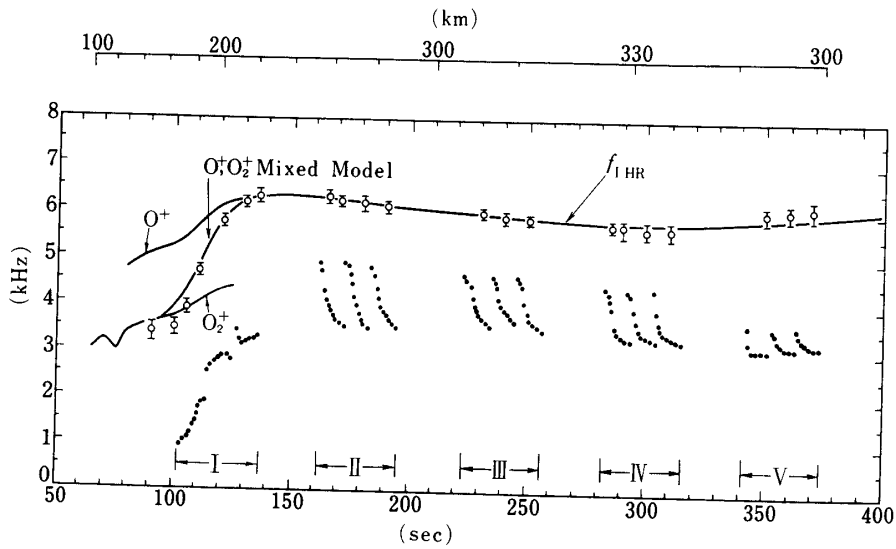
#### 4.3

第5図は、K-9M-41号機で観測された低域ハイブリッド共鳴周波数を飛行時刻に対してプロットしたものである[7]。イオン構成が、160 km 以下では $O_2^+$ 、210 km 以上では $O^+$ のみとし、かつ、中間領域では両者が直線的に変化しているものと仮定した時の低域ハイブリッド共鳴周波数の計算値が実曲線で表わされている。観測値は理論曲線と良く一致しており、これから、イオン組成の変化の様子が明らかである。

第2表は、K-10-12号機、及び、K-9M-41号機の実験日時、電離層条件、及び、ロケットの飛跡データをまとめたものである。実験の時刻、及び、季節は異なるが、4-24-3で述べたイオン組成の遷移層高度に関する観測結果は本稿の考察を十二分に支援するものとなっている。



第4図 イオン組成の高度分布 (K-10-12号機) [6]



第5図 イオン組成の測定値 (K-9M-41号機) [7]

第2表

ロケット	年月日	時刻L.T	$\alpha$	kp	Sa	Rz	最高々度	到達距離
K-10-12	Jan. 18. 1976	14:20	62°	3 <sup>-</sup>	76.7	20	212 km	354 km
K-9M-41	Jan. 19. 1973	18:00	100°	4 <sup>-</sup>	94.8	47	330 km	345 km

## 5. 結 言

K-9 M-54号機, 及び, 55号機に搭載されたインピーダンスプローブによる電子密度シース容量値, 及び, 電子温度の高精度測定の結果として, 電離層における重要なパラメータの一つであるイオン組成の遷移層高度, 及び, その厚さの観測が行なわれた. 今回得られたイオン組成の遷移領域の高度, 及び, 厚さは, K-10-12号機, 及び, K-9 M-41号機によって観測された結果と良く一致するものであった. インピーダンスプローブで測定されるシース容量値のイオン効果に関して, さらに, 理論的検討, 及び, 室内実験, 並びにロケット実験による考察等が多面的かつ有機的に進められることが必要であると考えられる. 今後の具体的な計画として1977年8月に予定されている大型スペースチェンバーにおける室内実験と, 同年9月に打ち上げが計画されているK-9 M-59号機による観測実験について簡単に記述する.

(1) 大型スペースチェンバーは電離層領域のプラズマを生成できる地上の実験設備である. 室内実験の場合, ロケットのシース, 及び, Wake, また, プローブ自身の姿勢, 及び, Wakeの影響がなく, プラズマ条件, すなわち, 電子密度, 電子温度, 磁場強度, 及び, イオンの種類を自由に変化させることができ, かつ, 時間的に安定なプラズマ中で実験できる長所がある. このチェンバー実験では, イオンの種類の変化に基づくプローブ電位の変化によってシース容量値がどのように変化するかを調べる.

(2) K-9 M-59号機は夏の夕暮れ時に打ち上げられ,  $O_3$ ,  $O_2$ ,  $O^+$ , NO, N, 及び, 電子の密度と電子温度の高度分布の観測が行なわれる. インピーダンスプローブによって測定されるシース容量値に関して次のようなことが調べられる.

(i) 19時頃の打ち上げであるので, 本稿で報告した6時と11時の結果と合わせて, 遷移層高度の日変化の吟味がされる.

(ii)  $O^+$ , 及び, NOの密度が同時に観測されるのでイオン組成の遷移層領域に関して比較検討がされる.

(iii) 号機によるシース厚の相違が検討される. その原因としては, (1)プローブ表面の汚れの違い, (2)印加波形の違いに基づくプローブ電位の違い, (3)ロケット周囲のシース厚の違い, (4)プローブの姿勢の違いによるWakeの違い, (5)ロケットの速度の違い, (6)データの0点のshiftの違い, (7)プローブからの光電子の流出量の違いによるプローブ電位の違い, ……などが考えられる.

理論的実験的検討がさらに進んだ段階に到れば, 電離層熱圏におけるイオンの遷移層高度の太陽活動度, 地磁気活動度との関係, あるいは, その日変化, 季節変化, 及び, 緯度特性などの研究の手段として利用されることが期待されている.

## 謝 辞

K-9 M-54号機, 55号機の実験主任, 及び, 観測ロケット実験班の各位に謝意を表します. 搭載用インピーダンスプローブを製作された明星電気株式会社の各位に感謝致します. 両号機の電子温度の測定結果は平尾研究室のお世話になりました. 有益なコメントを下された木村磐根先生, 大家寛先生に深謝致します.



1977年8月20日 新設部(科学)

## 参考文献

- [ 1 ] H. Oya and T. Obayashi; A rocket experiment by a new impedance probe, Rept. Ionos. Space Res. Japan, 20, 199-213 (1966).
- [ 2 ] T. Aso; A sheath resonance observed by a high frequency impedance probe, J.G.G., 25, 325-330 (1970).
- [ 3 ] K. Hirao and K. Oyama; An improved type of electron temperature probe, J.G.G., 22, 393-402 (1970).
- [ 4 ] M. Ejiri and T. Obayashi; Measurement of ionosphere by the gyroplasma probe, Rept. Ionos. Space Res. Japan, 24, No. 1, 1-12 (1970).
- [ 5 ] H. Oya; Ionospheric plasma disturbances due to a moving space vehicle, Planet. Space Sci., 18, 739-902 (1970).
- [ 6 ] T. Suitsu, I. Iwamoto and N. Fugono; K-10-12号機による  
イオン組成の観測(CPI), 宇宙観測シンポジウム, 東京大学宇宙航空研究所(1976).
- [ 7 ] H. Matsumoto, S. Miyatake and I. Kimura; Rocket experiment on spontaneously and artificially stimulated VLF plasma waves in the ionosphere, J.G.R., 80, No. 19, 2829-2834 (1975).