

## K-9 M-81 号ロケットによる E, F 層の観測結果

雨宮 宏\*・小山孝一郎\*\*

### Observation of E and F Layers in a Winter Ionosphere by K-9M-81 Rocket

By

Hiroshi AMEMIYA and Koichiro OYAMA

**Abstract:** The report relates to the measurements of positive ions and the energy distribution of thermal electrons in a winter ionosphere. Data were taken by a K-9M-81 rocket launched from Kagoshima Space center at Uchinoura on January 25 11 h 00 m in 1988. A vacuum sealed Faraday cup was used to measure the ion saturation current and the structure of a high energy tail of electrons. The former could be measured from 90 km while the latter from altitudes higher than 170 km. The positive ion density was determined from the ion saturation current and the data from the electron temperature probe, and was compared with previous data around the same time. A relatively good reproducibility was seen in the F-layer, while a variation was observed in the E-layer.

#### 概 要

本報告は 1988 年 1 月 25 日 11 時に内の浦から打ち上げられた K-9 M-81 号ロケットにより観測された電離層正イオン密度および

---

\* 理研

\*\* 宇宙研

熱的電子のエネルギー分布に関する。今回の測定では真空封じファラデーカップを使用し特に電子の高エネルギー尾部の測定に重点を置いた。正イオン電流は 90 km から、熱的電子の高エネルギー尾部は 170 km 以上の高度で観測出来た。正イオン飽和電流と電子温度計のデータから求めたプラズマ密度を従来の冬の同じ時刻のデータと比較した。F 層では比較的再現性の良い密度分布が得られたが、E 層は従来のデータより多少くい違いを示した。

### 1. はじめに

内之浦上空では冬の正午付近の時間帯では E 層約 100 km において高い電子温度が電子温度計によって観測されていた[1]。また、従来熱的電子エネルギー分布の観測結果は昼から夕方時間帯では高エネルギー尾部において盛り上がりが見られ[2]、窒素分子の脱励起過程を示唆するデータも得られた[3, 4]。熱的電子の加熱機構として光電子によるクーロン衝突、波動による加熱、振動励起された窒素分子、酸素分子との超弾性衝突が考えられる。スペースチェンバにおけるシミュレーション実験では熱的電子が振動励起窒素分子によってこれらが存在しない場合に比し 0.1-0.3 程度まで冷却されること、一方一部エネルギーが超弾性衝突を通して返還され 0.3-0.6 eV 付近に非熱的電子が形成される事が分かった[5, 6]。

本観測項目の目的は電子エネルギー分布をファラデーカップを用いて高エネルギー尾部まで正確に測定し、同時観測の窒素分子の振動温度等、他のデータと比較することにより上記時刻における電離層の熱的電子の加熱冷却機構を解明することにあつた。さらに、従来あまり観測されていない正イオン飽和電流を測定、プラズマ密度をイオン電流から求め、インピダンスプローブからの電子密度と比較する事により電離層の正イオンの等価質量の推定を行う事も含まれている。

### 2. 測定方法と機器概要

機器の概要は以下の通りである。

測定には 2 枚のグリッドとコレクタからなるファラデーカップを用い二つの測定モード、(1)正イオン飽和領域と電子エネルギー分布の高エネルギー尾部を測定するモード、(2)正イオンを除去し電子電流のみを測定するモードで動作させた。

測定回路：

上記の 2 モード測定を各々ファラデーカップの第 1 グリッド  $G_1$  を (i)他電極と共通に接続して全電極を一体として使用した場合、(ii)空間電位以上の電圧にした場合について実行する。第 1 図はファラデーカップの測定原理図である。第 2 グリッド  $G_2$  には常に三角波掃引電圧を印加しエネルギー選択を行い、コレクタ C は  $G_2$  を通過した電子を捕集する。三角波掃引電圧  $V_p$  に 1 Hz 毎に  $SW_2$  により発振器  $f_1$  (周波数 6.5 kHz),  $f_2$  (9 kHz) から

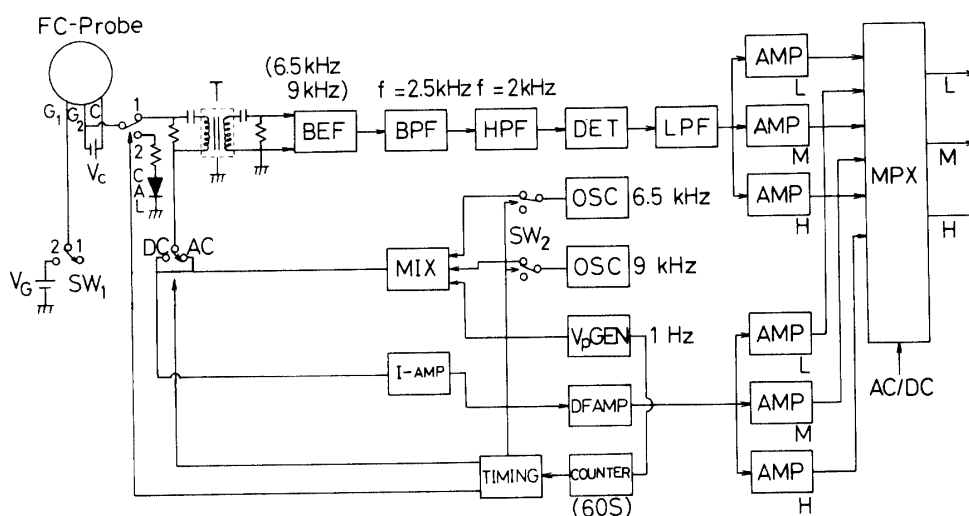


Fig. 1 Schematic diagram of the measuring circuit.  $V_p$  GEN: Probe voltage generator, MIX: Mixer, I-AMP: DC current amplifier, DFAMP: Differential amplifier, OSC: Oscillators, T: Transformer, BEF: Band elimination filter, BPF: Band pass filter, HPF: High pass filter, DET: Detector, LPF: Low pass filter, CAL: Dummy element for calibration.

の正弦波信号を混合器 MIX により重畳しトランス T を経てコレクタ C に印加, 直流的な電流 ( $i_p$ )-電圧 ( $V_p$ ) 特性とその二次微係数を交互に測定する回路からなる。微分をとるのは二次微係数がエネルギー分布,  $f(E)$ , の関数であるというドリベステン法によるものである。即ち, プロブ電流と  $f(E)$  の間には次式が成り立つ。

$$f(eV_p) = \{4m^{1/2} V_p^{1/2} / (2^{1/2} A e^5 / 2n_e)\} \cdot d^2 i / dV_p^2. \quad (1)$$

ここで,  $e$  は電子の質量,  $A$  はプロブ表面積である。直流信号測定時は発振器 OSC からの信号は重畳せず三角波電圧  $V_p$  ( $-2V \rightarrow +2V$ ) のみをプロブに印加し直流増幅器 I-AMP によりピックアップした信号を差動増幅器 DFAMP で増幅しさらに別の直流増幅器 AMP で 3 つの相対利得 ( $\times 1, \times 5, \times 25$ ) で増幅する。交流信号測定時は 2 台の正弦波発振器 OSC からの信号をプロブ電圧  $V_p$  に重畳し, ビート周波数成分をトランスで受けたのち帯域除去フィルタ BEF, 狭帯域増幅器 BPF, 高域フィルタ HPF, 直線検波器 DET, 低域フィルタ LPF を通した後さらに直流増幅器 AMP で 3 つの相対利得 ( $\times 1, \times 5, \times 25$ ) で増幅する。観測中 64 秒毎にプロブをダミー素子 CAL (ダイオードと抵抗の直列接続) に切り替え装置の状態を監視する。

探極は高エネルギー部と正イオンを特に精密測定するため 80 mm  $\phi$  の 2 枚メッシュとコレクタからなるファラデーカップである。第 2 図にその断面図を示す。図で  $G_1, G_2, C$  はそれぞれ第 1 グリッド, 第 2 グリッド, コレクタである。各電極のリードはハーメチック

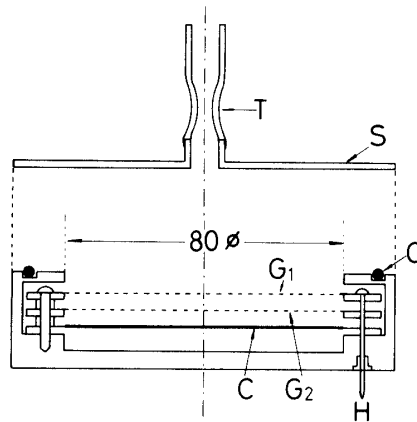


Fig. 2 Cross-section of the Faraday cup.  $G_1$ : first grid,  $G_2$ : second grid,  $C$ : collector,  $O$ : O-ring,  $H$ : hermetically sealed electrodes,  $S$ : cover.

シール  $H$  を通してカップの外部に取り出した。ステンレスの蓋  $S$  をオーリング  $O$  を介して抑え真空中に排気したのち中央のガラス管  $T$  をチップオフして真空封じした。高真空の上層大気ではカップの内外が同圧となるのでカップ本体の外側に取り付けられたスプリング (図示せず) により蓋を飛ばす仕掛けになっている。そのテストは予めチェンバで行い  $10^{-3}$  Torr 以下になると自動的に蓋が開き飛ぶ事を確認した。また、スピン・タイマテストではファラデーカップの内部は大気圧として実験しスピンにより蓋の飛ぶ事を確認した。観測時はワイヤカッターを用いて展張の後、蓋飛ばしを行い電極部をプラズマに露出させた。

データは直流 (プローブ) 電流, 二次微係数信号のシーケンスで3つのPCMチャンネル ( $\times 4N$ ) にそれぞれのゲインで各モード交互に時分割送信した。タイマは以下の通りである。

- 51 秒 テレメタ CI-PI 切り替え
- 52 秒 円筒プローブガラス割り
- 53 秒 ファラデーカップ展張
- 54 秒 ファラデーカップ蓋の展開

ロケットは1988年1月25日、午前11時内之浦から仰角  $79^\circ$ 、方位角  $130^\circ$  で打ち上げられ最高高度は359.3 km で約9分間に亙り観測が行われた。第3図は高度  $h$  と水平距離  $R$  の関係を示す。曲線上の数字は打上げ後の秒時である。

### 3. 観測結果

第4図は70秒-110秒, 110秒-150秒間のゲイン ( $\times 5$ ) の信号図で磁気テープのPCM信号をディスクに移した後XYプロッタに描かせた図である。図中 cal (AC, DC) はダミーによる規準信号の交流および直流分をそれぞれ表わす。これに引き続き測定モード (ii), (i) の交流および直流信号 (AC, DC) が現われている。100 km 付近では感度が十分でな

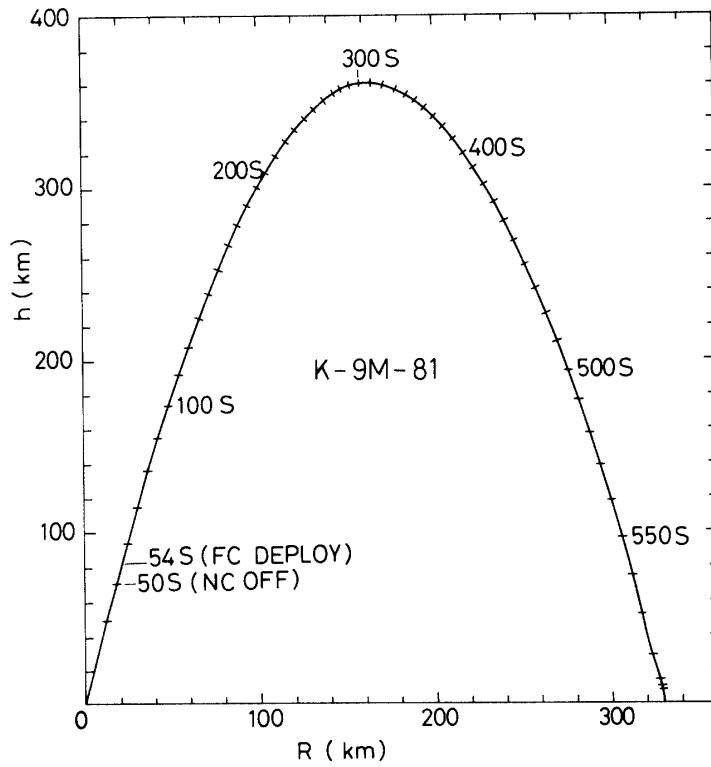
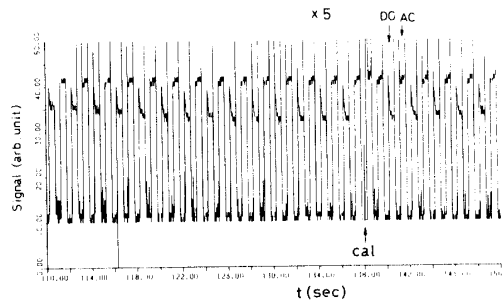
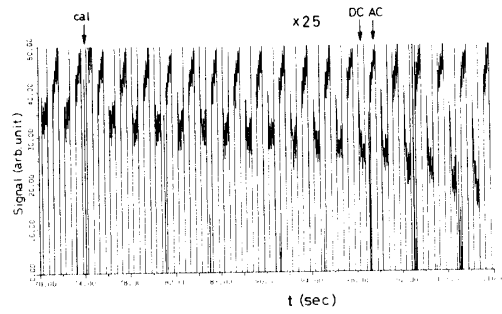


Fig. 3 Plot of the height  $h$  and the range  $R$  of K-9M-81 rocket.

(a) 130-190 km



(b) 190-250 km

Fig. 4 Time chart of mode-1 signal (AC, DC), mode-2 signal (AC, DC) and CAL signal (AC, DC).

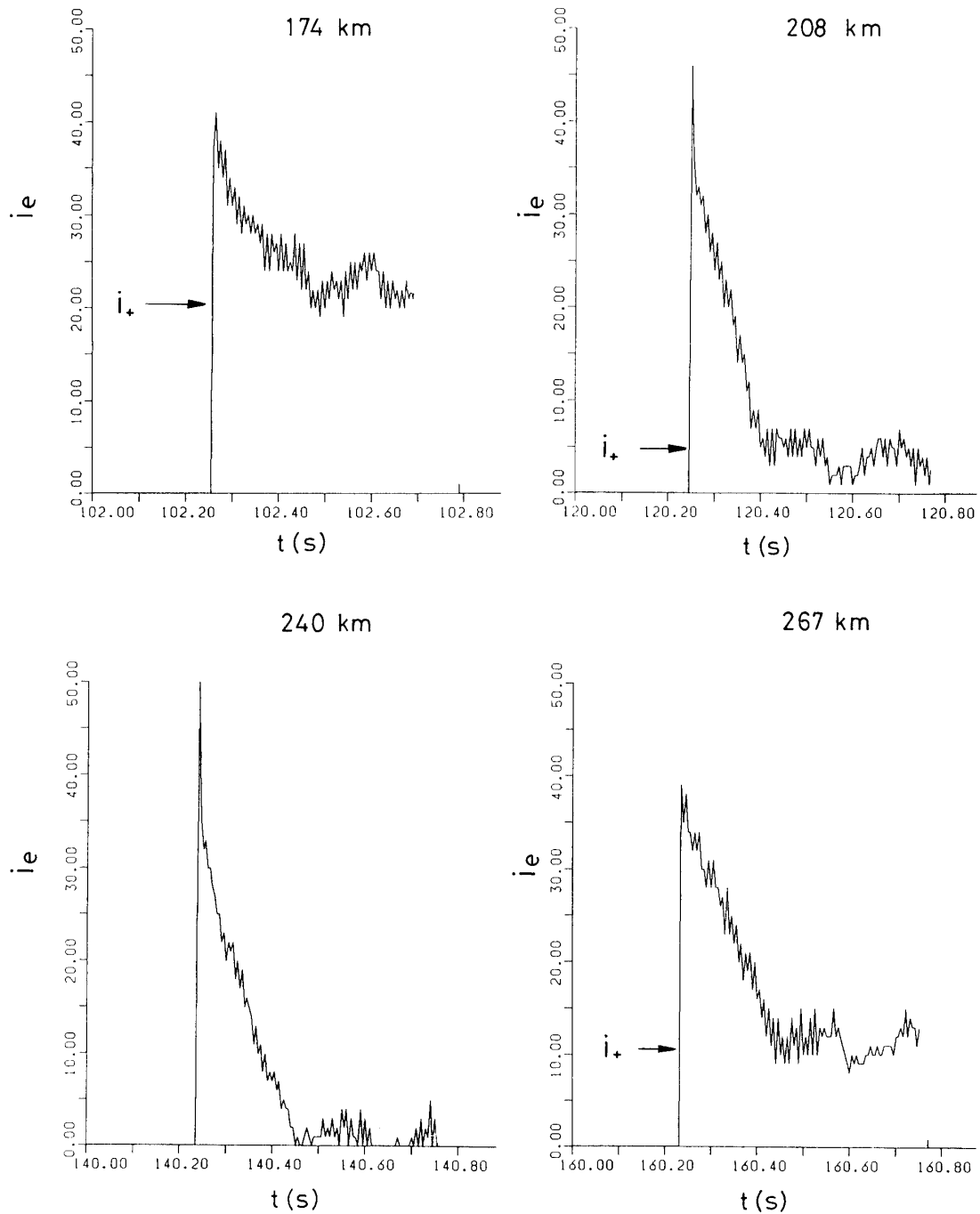


Fig.5 Current-voltage characteristics of the Faraday cup's collector current showing the high energy tail of the electron energy distribution at  $h=170-240$  km. The abscissa is expressed by the time (s), where 1 sec. corresponds to 4 V.

く信号の解析は可能でなかった。ファラデーカップの蓋は開いたが展張がロケット本体に対し完全に水平位置まで行かなかった可能性がある。そのためモード(ii)の信号は完全には正常な特性が得られなかった。モード(i)の直流信号は正イオン飽和電流から電子反発電流特性が見られ、このデータを主として解析した。矢印は電流零のレベルである。

第5図は100秒-140秒(170-240 km)の間の信号において測定モード(i)の直流信号を拡大したもので高度および秒時をパラメタとして示す。正イオン飽和電流レベル  $i_+$  から電流が上昇しているのは電子電流  $i_e$  の逆電位特性を表わす。このレベルがうねる様に変動しているのはスピンのためと思われる。逆電位特性の傾斜から求めた高エネルギー尾部の電子温度  $T_e$  は0.8-1 eV 付近となった。この値は熱的電子の低エネルギー部の温度に比べはるかに高いが、その一原因としてエネルギーの高い光電子が一部入りこんでいるためとも考えられる。一方、測定上の問題としてファラデーカップが半開きであったためにプローブが一部不完全にプラズマに露出されたため、シースの効果により見かけ上温度が高くなった事も一原因と考えられる。

第6図に正イオン飽和電流  $i_+$  の高度  $h$  に対する分布を示す。温度、イオン質量を無視しても電離層の構造が見られる。

次に、上記正イオン飽和電流値より次式にもとずき正イオン密度  $n_+$  を求めた。

$$n_+ = i_+ / \{e(kT_e/M)^{1/2}A\}. \quad (2)$$

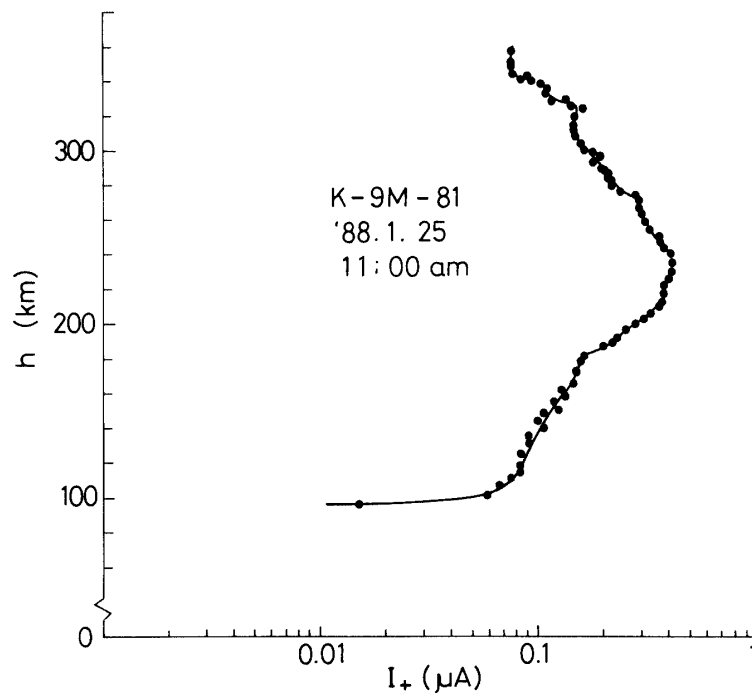


Fig. 6 Plot of the positive ion current vs height.

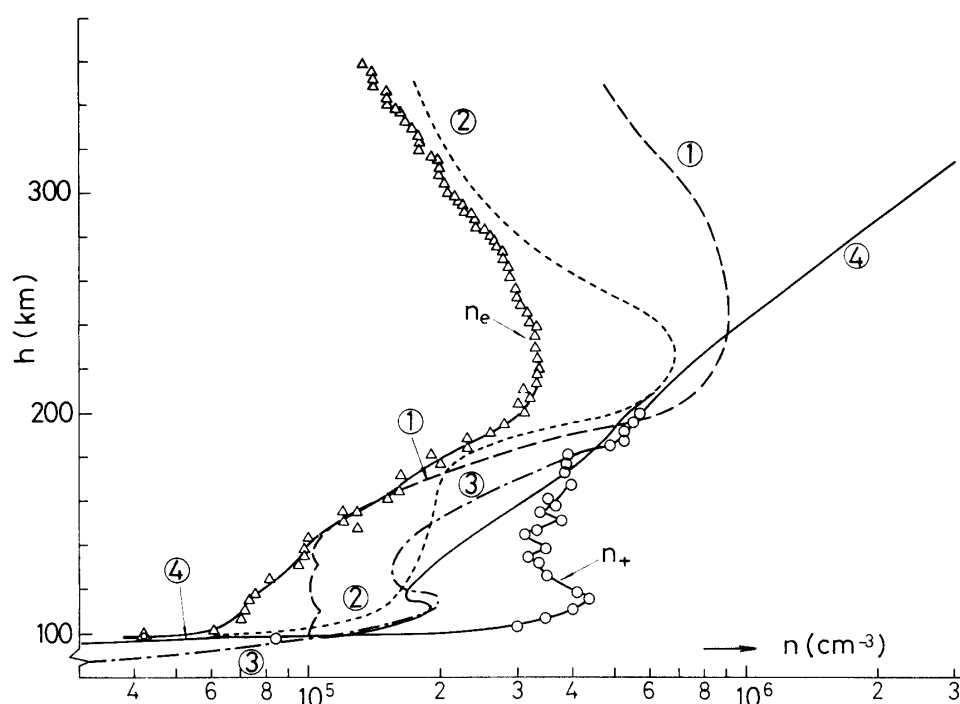


Fig. 7 Plot of the positive ion density  $n_+$  in comparison with the electron density  $n_e$  by the impedance probe and those in previous observations.

ここで、 $k$ はボルツマン定数、 $M$ は正イオンの等価質量である。200 km まではイオンは主として  $\text{NO}^+$  および  $\text{O}_2^+$ 、それ以上の高度では  $\text{O}^+$  と仮定して算出した。また、イオン電流はボームによる式に従うと仮定し、同時搭載の電子温度計による  $T_e$  の値を採用した。第7図に正イオン密度  $n_+$  を高度  $h$  の関数としてプロットしたものを○で示す。同時測定されたインピーダンスプローブによる電子密度 [7] を△で示す。過去の同じ頃の時刻の電子密度の高度分布を比較のためにプロットしてある。即ち、①、②、③、④は次の日時の  $n_e$  である [8-11]。

- 1 : S-210-6, 1972.1.21, 11 h 24 m  
(T. Obayashi & Ejiri)
- 2 : K-9 M-62, 1978.1.22, 11 h 00 m  
(Y. Watanabe, M. Ejiri & T. Obayashi)
- 3 : S-310-5, 1979.1.31, 11 h 00 m  
(Y. Watanabe & T. Obayashi)
- 4 : K-9 M-69, 1980.1.16, 12 h 00 m  
(Y. Watanabe & T. Obayashi)

第7図から分かる様に、E層の密度は観測毎にばらつきがあるが、F層ではほぼ一定の範囲の値に入っている。 $\text{NO}^+$  および  $\text{O}_2^+$  から  $\text{O}^+$  に切り替わる高度を200 km より低く仮定するともう少し従来データに近ずき100 km 近辺で密度の極大が生じることになる。過去



の12時での密度(④)と比較して見ると、240 km以上で差が生じF層の密度の11時から12時にかけて増大する事が分かる。

#### 4. 結 論

本報告は1988年1月25日11時に内の浦から打ち上げられたK-9M-81号ロケットにより観測された電離層熱的電子のエネルギー分布及び正イオン密度に関する。今回の測定では2枚のグリッドとコレクタからなる真空封じファラデーカップを使用し特に電子の高エネルギー尾部の測定に重点を置いた。熱的電子の高エネルギー尾部は170 km以上の高度で観測出来たがそれより低い高度では感度が低い事と雑音が大きいため測定が困難であった。プラズマ密度は正イオン飽和電流と同時搭載の電子温度計による電子温度から正イオン密度を求める事によって得た。従来の冬の同じ時刻のデータと比較した所F層では密度分布は再現性の良い事が分った。E層では従来のデータより若干の相違が見られた。

終りに、本観測機器およびファラデーカップの製作において松栄電子株式会社、堀江 茂氏、池田 滋氏に、プローブ製作に関し理化学研究所技術部菅原正吾技師に感謝する。

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] K. Hirao and K. Oyama : Space Research 12 (1972) 1335.
- [ 2 ] K. Oyama, K. Hirao, P. M. Banks and P. R. Williamson : J. Geomag. Geoelect. 35 (1983) 185.
- [ 3 ] H. Amemiya, K. Oyama and K. Hirao : Planet. Space Res. 33 (1985) 1985.
- [ 4 ] H. Amemiya : Ann. Phys. 42 (1985) 293.
- [ 5 ] H. Amemiya : J. Phys. Soc. Japan 55 (1986) 169.
- [ 6 ] H. Amemiya, S. Ono and S. Teii : J. Phys. Soc. Japan 57 (1988) 4312.
- [ 7 ] 森岡 昭 : private communication 1987.
- [ 8 ] T. Obayashi & Ejiri : Sounding Rocket Data in Japan vol. 1 ISAS p. 50.
- [ 9 ] Y. Watanabe, M. Ejiri & T. Obayashi : Sounding Rocket Data in Japan vol. 2 ISAS p. 35.
- [10] Y. Watanabe & T. Obayashi : Sounding Rocket Data in Japan vol. 4 ISAS p. 17.
- [11] Y. Watanabe & T. Obayashi : Sounding Rocket Data in Japan vol. 4 ISAS p. 23