

ロケットによる電離層の直接観測

——IQSY 期間中における荷電粒子密度の観測結果——

宮崎 茂*・大塩 光夫*・平尾 邦雄

Direct Observations of the Ionosphere by Sounding Rockets

——Results of Charged Particle Density Measurements during IQSY——

By

Shigeru MIYAZAKI, Mitsuo OSHIO and Kunio HIRAO

Abstract: The eleven times of the direct observation of the charged particle density in the ionosphere were made at Kagoshima Space Center during the International Years of the Quiet Sun (Jan. 1964-Dec. 1965). 3 three-stage Lambda rockets and 8 two-stage Kappa rockets of which peak altitudes were about 1000 km and 350 km, respectively, were used for the measurement of the ionosphere. The resonance probe method and the Langmuir probe method were used for the electron density measurements, and the ion trap method and also the Langmuir probe method were used for the positive ion density measurements.

In this paper, the summaries of the measuring instruments and the results and discussions of the ionospheric observations during IQSY are described.

概 要

1964年1月1日から始まって1965年12月31日に至るまでの2年間の太陽活動極小期国際観測年には、計11回の電離層荷電粒子密度の観測が行なわれ、その中には到達高度1000 km 以上にも及ぶ、3段式のラムダ型ロケットが3機打ち上げられた。電子密度測定には共振探極法およびラングミュア探極法を用い、正イオン密度測定にはイオン・トラップ法および固定電圧のラングミュア探極法を用いた。この論文では測定器の概要と荷電粒子密度の測定結果および議論を述べてある。

1. 緒 言

地上数十 km から数百 km の高度に存在する電離層の研究は短波による無線通信および電波伝ぱんの問題に関連して重要であるばかりでなく、電離層物理はもとより、地磁気・空電・宇宙線・大気光・極光・太陽電波・宇宙電波雑音等の上層大気物理学の研究に関連して重

* 郵政省電波研究所

要である。また電離層はその生成・消滅機構の主因が太陽に起因するという事実で明らかのごとく、電離層の物理的状態の太陽活動度による年変化、季節変化、日変化を長期にわたって、組織的・系統的に調べることは重要なことである。特にすべての議論の出発点になる基礎量の測定は重要な課題であり、ここでは基礎量のうち荷電粒子密度の観測結果について述べる。第1表には電離層荷電粒子密度の直接観測の一覧を示してある。

第1表 電離層直接観測一覧

ROCKET		DATE	TIME (J. S. T.)	ALT (km)
K-8-2	●	Jul. 17, 1960	1311	186
K-8-3		Sep. 22, 1960	1532	197.5
K-8-4		Spe. 26, 1960	2025	183
K-8-5		Mar. 27, 1961	1308	169.2
K-8-6		Apr. 18, 1961	2127	144.2
K-8-7		Jul. 21, 1961	1142	159
K-8-8		Oct. 24, 1961	1259	198
K-8-9	●	Oct. 30, 1961	2013	174.5
K-9L-2	⊖	Dec. 26, 1961	1405	347.6
K-8-10	●	May. 24, 1962	1950	0
K-9M-1	●	Nov. 25, 1962	1104	55.1
L-2-1	●	Aug. 24, 1963	1100	51
L-2-2	●	Dec. 11, 1963	1400	410
L-3-1	⊖	Jul. 11, 1964	1101	857
K-9M-4	●	Nov. 5, 1964	1201	356?
L-3-2		Jan. 31, 1965	1401	1040
K-9M-7	⊖	Feb. 6, 1965	1401	356?
L-3-3		Mar. 18, 1965	1907	1100
K-9M-8		Mar. 25, 1965	2021	324
K-9M-9		Mar. 27, 1965	1401	335
K-8-12		Jul. 16, 1965	1950	160
K-9M-13		Jul. 27, 1965	1210	317
K-9M-14		Oct. 4, 1965	1200	299
K-9M-16	⊖	Dec. 13, 1965	1520	318
L-3H-1		Mar. 5, 1966	1350	359
K-9M-15		Mar. 20, 1966	2115	307

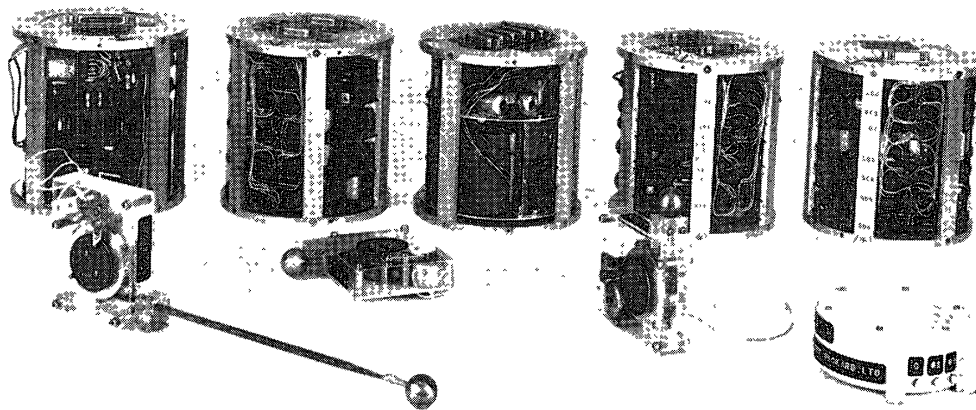
1960年7月に秋田県道川実験場において始められた観測ロケットによる電離層の直接観測は計10回行なわれて多くの資料を得た[1],[2],[3]。秋田実験場の末期におけるK-8-9のロケット頭胴部の開頭の不成功による観測不能、K-9L-2のテレメータ系の故障による部分的な観測、K-8-10のロケット自体の故障によって観測ができなかった。また観測ロケットの大型化、高性能化に伴って道川実験場およびロケット落下区域である日本海が手狭まになり、1962年11月から鹿児島県内之浦の鹿児島宇宙空間観測所(東経131°04'45'',北緯31°15'00'',地磁気緯度北緯19.8°)に移された。第1表にも示されている通り、初期の頃

は主としてロケット自体の故障で電離層観測はできなかったが、IQSY 期間後半の 1965 年に入って電離層観測が順調に行なわれてきた。第 1 表中の黒丸●はロケット本体の故障により観測ができなかったことを示し、半白丸◐はテレメータあるいは観測器の障害によって部分的に成功したことを示す。ここでは IQSY 期間中に行なわれた電離層観測について述べ、なお最後の L-3H-1 および K-9M-15 の 2 機は現在解析中であるので後の機会に報告する。

2. 測 定 器

2.1. 正イオン密度測定法

正イオン密度の測定にはイオン・トラップと称する電極を用いている。第 1 図最右端下にイオン・トラップの概観を示してある。すなわちイオン・トラップは三つの電極からなっ



第 1 図 L-3-3 搭載用電離層測定器

おり、上から二つはグリッドで上から G_1, G_2 と称し、最後の電極がコレクター C である。各電極は直径 8cm の円形で各々の間隔は 5mm になっている。グリッドは円形内に張られた直交格子状のもので線の間隔は約 2mm である。グリッド G_1 には負から正の直流可変掃引電圧を印加することによって、グリッドを通過するイオンおよび電子の量を制御する。コレクター C には負の電圧を印加して、グリッドを透過したイオンのみを捕集する。グリッド G_2 は昼間測定の場合、太陽のふく射によってコレクターの金属表面から放射される光電子を防ぐためにコレクターよりさらに負の電位を与えてある。

いまロケットの速度を v_R (正確にはロケットに搭載されたイオン・トラップ平面の電離層プラズマに対する相対速度)、イオン・トラップの開口表面積を S 、グリッドの透過係数を A とすれば、グリッド G_1 の電流電圧特性からプラズマの空間電位がわかるので、その電圧のときのコレクター C に流れるイオン電流からイオン密度が算定できる。プラズマの

空間電位においてはプローブの回わりに空間電荷層が存在しないので正確に平面電極として次の式によってイオン密度 N_i が求められる。

$$N_i = \frac{I}{SAe\sqrt{\frac{kT_i}{2\pi M}} \left[\exp(-r^2) + \sqrt{\frac{2}{\pi}} r \left\{ 1 + \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^r \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \right\} \right]}$$

$$r = \frac{v_R}{\sqrt{\frac{2kT_i}{M}}}$$

ただし、 I : コレクター・イオン電流, T_i : イオン温度, M : イオン質量, e : 電子電荷,
 k : ボルツマン定数

さらに $r > 1$ のときは上式は次のように近似される。

$$N_i = \frac{I}{SAev_R}$$

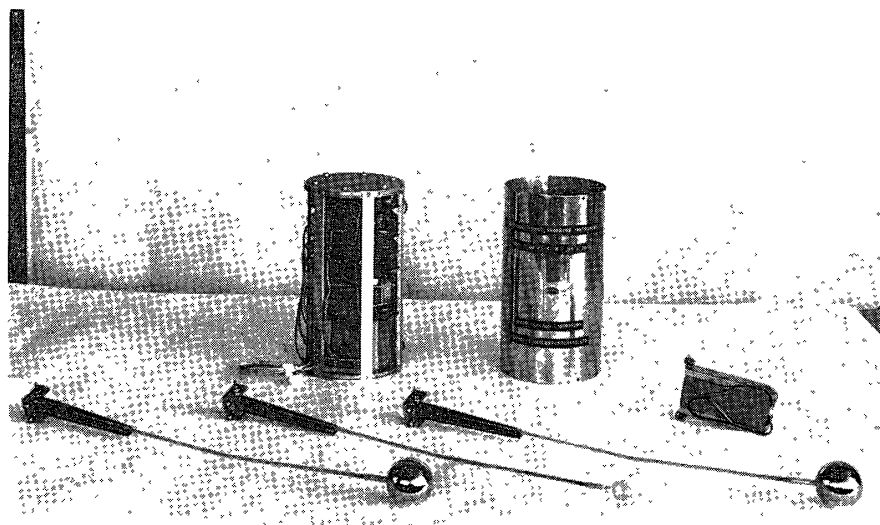
なお、イオン・トラップの各ロケットに関する電氣的諸元は第2表に示されている。備考欄の傘型方式とはロケット頭胴部の開頭までは頭胴部に格納されていて、開頭とともに傘のごとくイオン・トラップが出ることを示す。突出方式とはイオン・トラップがレールに沿って開頭とともに外側に突き出ること示す。

第2表 イオン・トラップの電氣的諸元

	K-9M-4	L-3-2	K-9M-7	L-3-3	K-9M-8	K-9M-9	K-9M-14
グリッド G ₁ 印加掃引電圧	(-4.0~ +3V)	-4.0~ 3.0V	(-4.0~ +3V)	-4.0~ +3.0V	-4.0~ +3.0V	-4.0~ +3.2V	-6~+5V
印加繰返し周期	500ms, 2c/s	500ms	500ms	500ms	500ms	500ms	500ms
グリッド G ₂ 印加電圧	-40.7V	(-37.5V)	(-37.5V)	-41.2V (VTV)	-40.8V	-40.5V (MPF)	(-37.5V)
コレクター C 印加電圧	-11.2V	(-10.5V)	(-10.8V)	-11.5V (VTV)	-11.4V (VTV)	-10.9V (MPF)	(-10.5V)
G ₁ 用増幅器利得	99倍	91.9倍	88.7倍	89.2倍	89.5倍	91.0倍	90倍
G ₁ 用入力抵抗	10kΩ	10kΩ	10kΩ	10kΩ	10kΩ	10kΩ	9.982kΩ
C用増幅器利得	62.7倍	63.4倍	63.5倍	63.6倍	63.2倍	63.5倍	63.2倍
C用入力抵抗	8.57kΩ	8.57kΩ	8.57kΩ	8.57kΩ	8.57kΩ	8.57kΩ	8.536kΩ
信号出力電圧	0~5V	0~5V	0~5V	0~5V	0~5V	0~5V	0~5V
備考	傘型方式	突出方式	傘型方式	固定	傘型方式	傘型方式	傘型方式

() 内は設計値

このほかに K-8-12 においてはグリッドには負の一定電圧を印加した方式を用いてある。また K-9M-13 にはペイロードの関係上、測定回路の簡単な固定電圧のラングミュアプローブ方式を用いてある。プローブとしては第2図下端中央に示されている直径 2cm の網状球形プローブを用いてある。これらの電氣的諸元は第3表に示されている。



第 2 図 K-9M-13 搭載用電離層測定器

第 3 表 イオン・プローブの電気的諸元

	K-8-12	K-9M-13
直流印加電圧	-24.7V	-24.0V
繰返し周期	6sec	6sec
増幅器入力抵抗	11.8M Ω	11.7M Ω
増幅器利得	6db	6db
基準電圧	2.66V	2.64V
信号出力電圧	0~5V	0~5V
備考	平面固定	網球 20 ϕ 傘型方式

2.2. 電子密度測定法

電子密度の測定にはレゾナンス・プローブ法を用いた。これはプローブに印加する高周波電界とプラズマ中の電子との相互作用により電子のプラズマ周波数付近において起こる共振現象を利用する測定法である。この共振周波数から計算によって電子密度を計算する。厳密にはプローブの周りに生ずるシースと称する正の空間電荷層のために共振周波数は電子のプラズマ振動数と異なる。

レゾナンス・プローブの特性をプラズマとシースの等価回路で考える。この場合次の三つの仮定をする。(I) イオンの運動を無視する, (II) 電子の衝突を無視する, (III) 電子の慣性を無視する。これら三つの仮定は電離層プラズマの場合にはかなり一般的なことである。これらの仮定によってシースの等価回路は容量のみによって表わされ、その値 C_s は次式で

示されるごとくである。

$$C_s = S e N_e \left(\frac{2}{9 N_e} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{k T_i \pi e} \right)^{1/4} \frac{3}{4} V_{dc}^{-1/4} \left[1 - \sqrt{\frac{\pi}{\eta}} \left\{ \operatorname{erf}(\sqrt{2\eta}) - \frac{1}{2} \right\} \right]$$

$$\eta = \frac{e V_{dc}}{k T_e}$$

ただし、 S : プローブ表面積, N_e : 電子密度, T_i : イオン温度, V_{dc} : プローブ直流印加電圧, T_e : 電子温度, e : 電子電荷, k : ボルツマン定数

次にレゾナンス, プローブの周波数特性の共振周波数 ω_{\max} から次の式によって電子のプラズマ振動数 ω_p を計算することができる。

$$\omega_p^2 = (1 + C_s) \omega_{\max}^2 \frac{\omega_{\max}^2 - \omega_H^2}{\omega_{\max}^2 - \frac{1}{2} \omega_H^2}$$

ただし、 $\omega_H^2 = eH/mc$, また、 H : 磁場の強さ, m : 電子質量, e : 電子電荷, C : 光の速さかくして電子プラズマ振動数 ω_p から $\omega_p^2 = 4\pi e^2 N_e/m$ によって電子密度が求められる。

各ロケットに関するレゾナンス・プローブの電氣的諸元は第4表に示されている。プローブは第3図に示されているごとく直径 20mm の完全球プローブを使用している。また備考

第4表 レゾナンス・プローブの電氣的諸元

	L-3-1	K-9M-4	L-3-2	K-9M-7
印加掃引周波数	(100kc~12Mc)	(100kc~12Mc)	(100kc~12Mc)	(100kc~12Mc)
印加電圧	(0.1V peak) (0.2V peak)	(0.1V peak) (0.2V peak)	(0.1V peak) (0.2V peak)	(0.1V peak) (0.2V peak)
繰返し周期	500ms	500ms	500ms	500ms
増幅器利得	(10倍)	(10倍)	(10倍)	(10倍)
基準電圧	1V 2.5V 4V	1V 2.5V 4V	1V 2.5V 4V	1V 2.5V 4V
信号出力電圧	0~5V	0~5V	0~5V	0~5V
備考	固定円板形	球形 20φ 巻尺方式	球形 20φ 巻尺方式	球形 20φ 傘型方式
	L-3-3	K-9M-8	K-9M-9	K-8-12
印加掃引周波数	(100kc~12Mc)	(100kc~12Mc)	(100kc~12Mc)	(100kc~12Mc)
印加電圧	(0.1V peak) (0.2V peak)	(0.1V peak) (0.2V peak)	(0.1V peak) (0.2V peak)	(0.1V peak) (0.2V peak)
繰返し周期	500ms	500ms	500ms	500ms
増幅器利得	(10倍)	(10倍)	(10倍)	(10倍)
基準電圧	3.02V 1.51V	3.00V 1.50V	3.00V 1.50V	なし
信号出力電圧	0~5V	0~5V	0~5V	0~5V
備考	球形 20φ 巻尺方式	球形 20φ 巻尺方式	球形 20φ 傘型方式	球形 20φ 巻尺方式

() 内は設計値

欄の巻尺方式とは頭胴部の開頭以前までは、プローブの支持部が巻尺のごとく格納されており、開頭とともにプローブが突き出る方式である。なお K-9M-16 にはペイロードの関係上、固定電圧のラングミア・プローブ方式を用いた。その電氣的諸元は第5表に示されている。

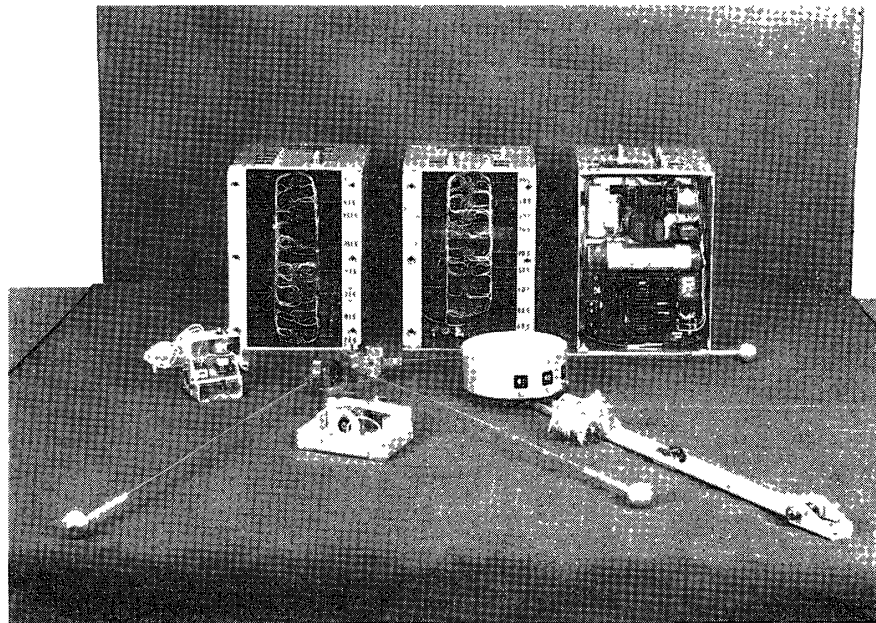
2.3. 測定器の構成および構造

第1, 2, 3 図には L-3-3, K-9M-13, K-9M-9 の電離層観測器とプローブ系を示してある。これらの図にはプローブの傘型方式、巻尺方式の機構も示されている。第4図は測定器内部のプリント板の一部を示してあり、すべての回路はエレクトロニクス化され、機械的駆動機構は用いていない。

第5図および第6図に電離層測定器を実際のロケットの取付板に取付けたところを示し、第5図は開頭以前の状態を示し、第6図は開頭後の様子を示している。すなわちプローブがロケット本体の外側へ突出していることを示している。第7図お

第5表 エレクトロン・プローブの電氣的諸元

	K-9M-16
直流印加電圧	4.0V
繰返し周期	6s
増幅器入力抵抗	61.3k Ω
増幅器利得	6db
基準電圧	2.66V
信号出力電圧	0~5V
備考	球形 20 ϕ 巻尺方式



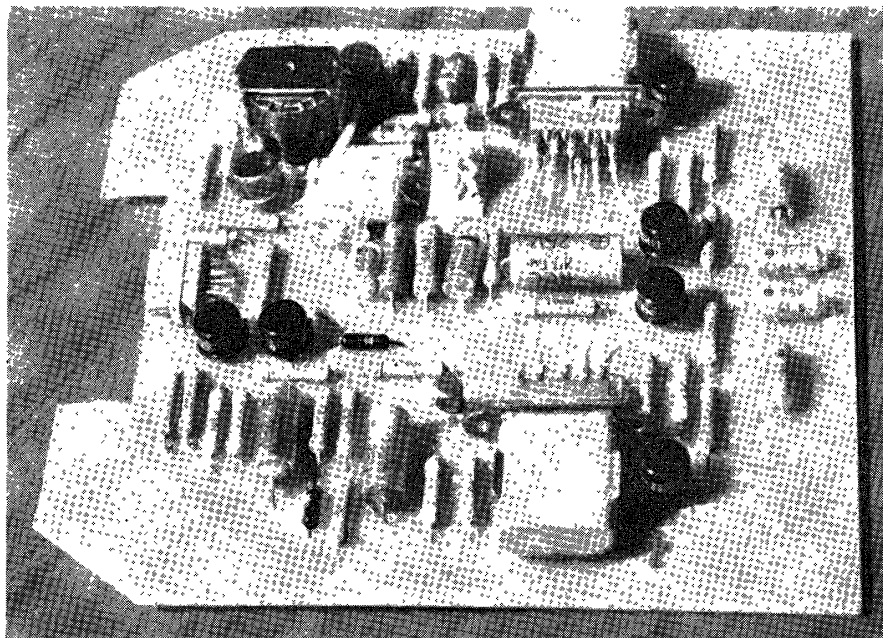
第3図 K-9M-9 搭載用電離層測定器

よび第8図は K-9M-7 および K-9M-15 の搭載機器を示している。第7図は開頭以前の状態であり、第8図は開頭後の状態である。第9図は L-3-3 の場合の電離層測定信号記録の一部を示してある。

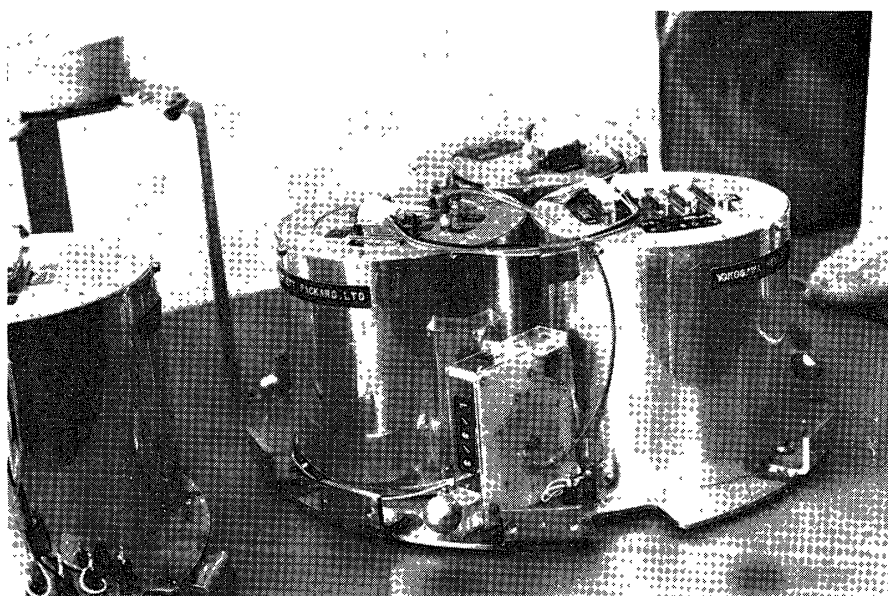
なお、測定方法の詳細については文献 [4] を参照されたい。

3. 観測結果

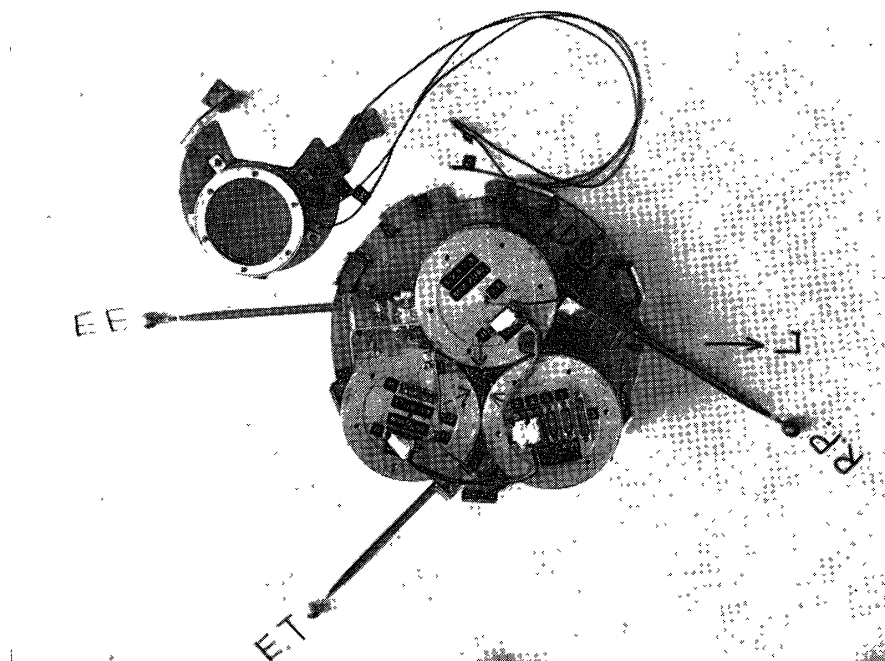
観測ロケットごとに観測結果を述べていく。



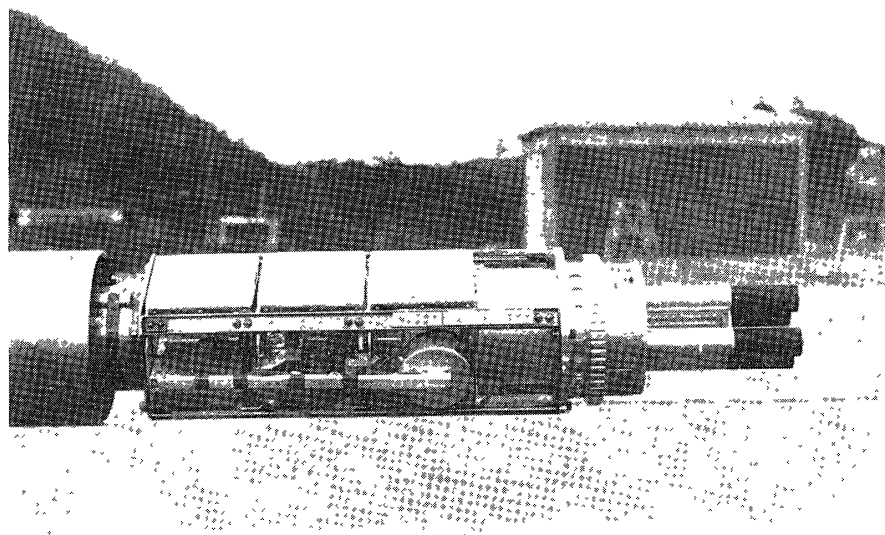
第4図 測定回路



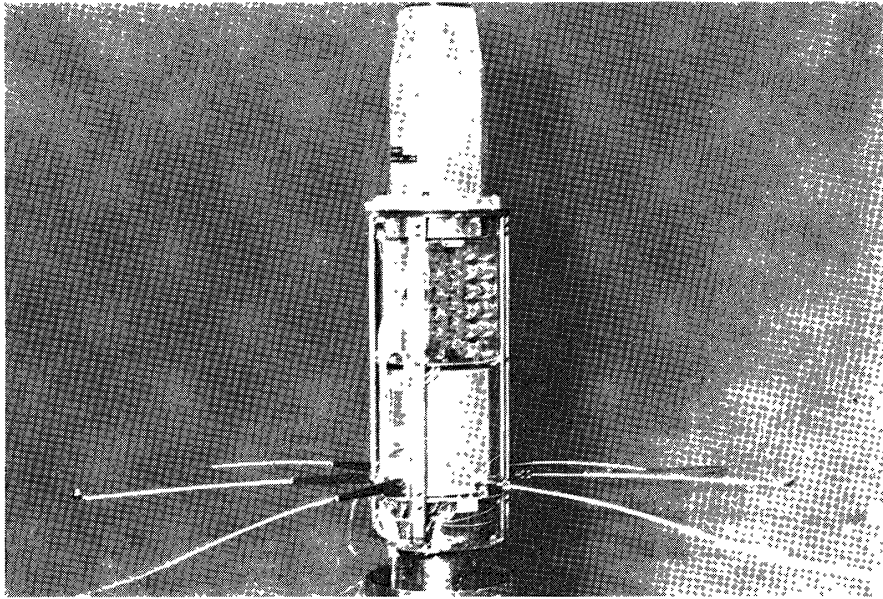
第5図 L-3-3 搭載用測定部およびプローブ系



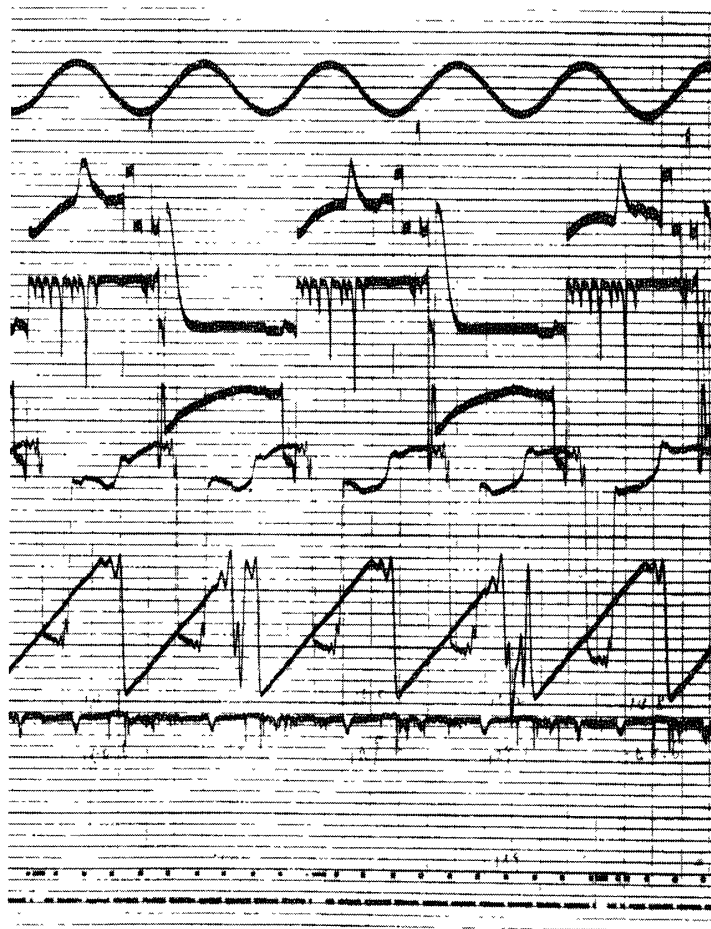
第6図 L-3-3 搭載用測定部およびプローブ系 (開頭後の状態)



第7図 K-9M-7 搭載測定機



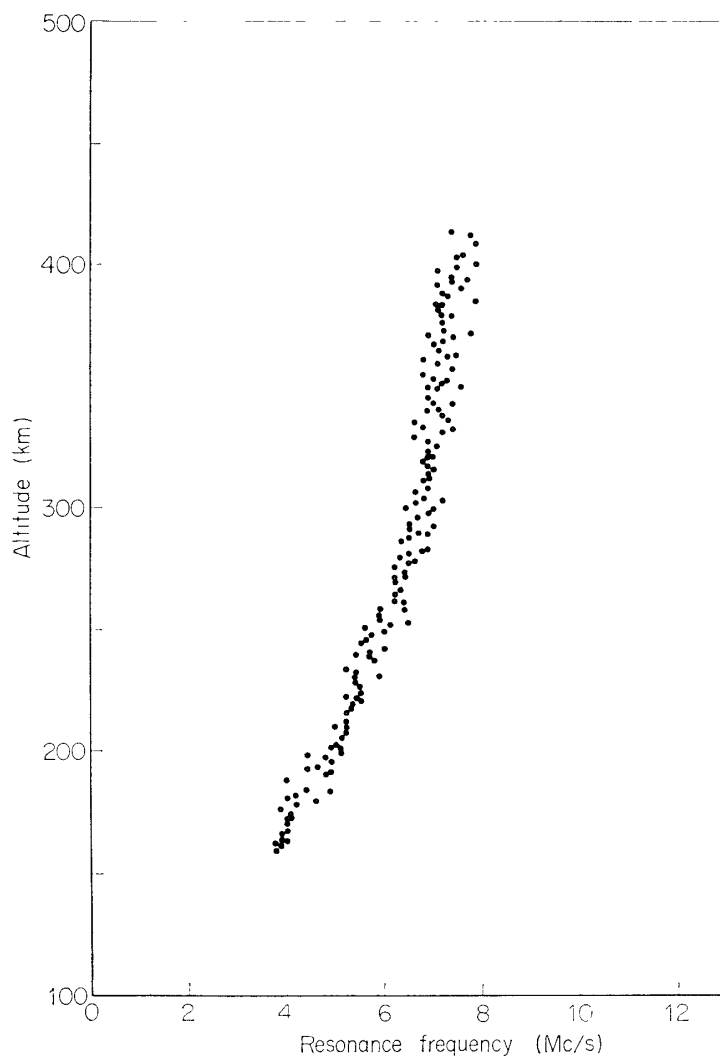
第8図 K-9M-15 搭載測定器



第9図 電離層記録の一部 (L-3-3)

3.1. L-3-1

高度 141~412km の電子密度が 1964 年 7 月 11 日, 11 時 02 分にロケット本体の側面に取付けられた直径 8cm の円形平面電極により測定された. その結果は第 10 図に示してある. この図では横軸はレゾナンス・プローブの共振周波数を示している. これによると 3.8Mc/s から 8Mc/s まで単調に増加している.



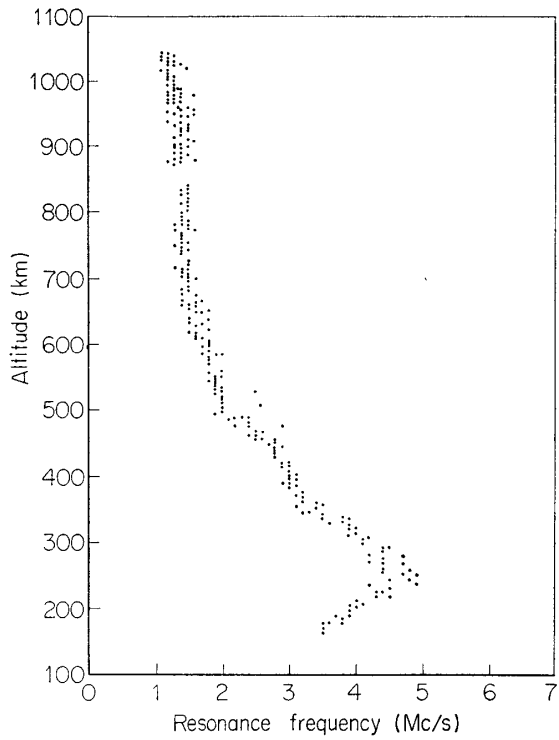
第 10 図 L-3-1 による共振周波数の観測結果
(1964 年 7 月 11 日, 11 時 01 分, 上昇時)

3.2. K-9M-4

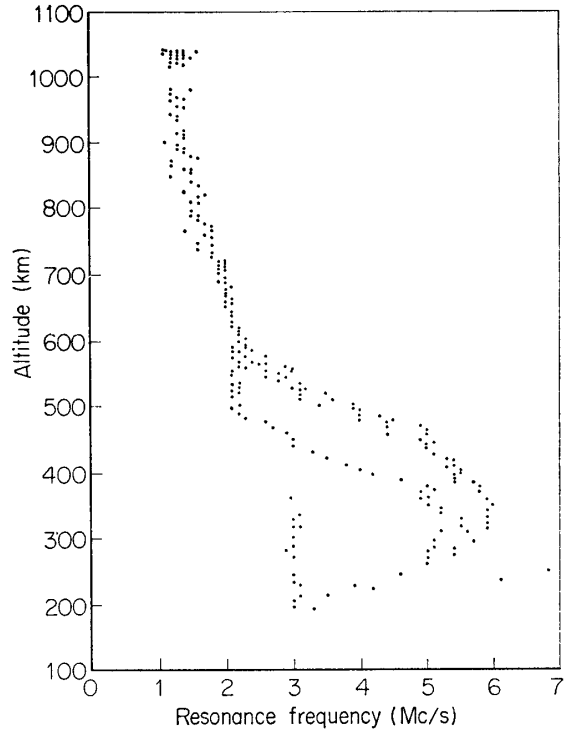
ロケット自体の異常振動のためのレーダ, 測定器等が破損して全項目測定ができなかった.

3.3. L-3-2

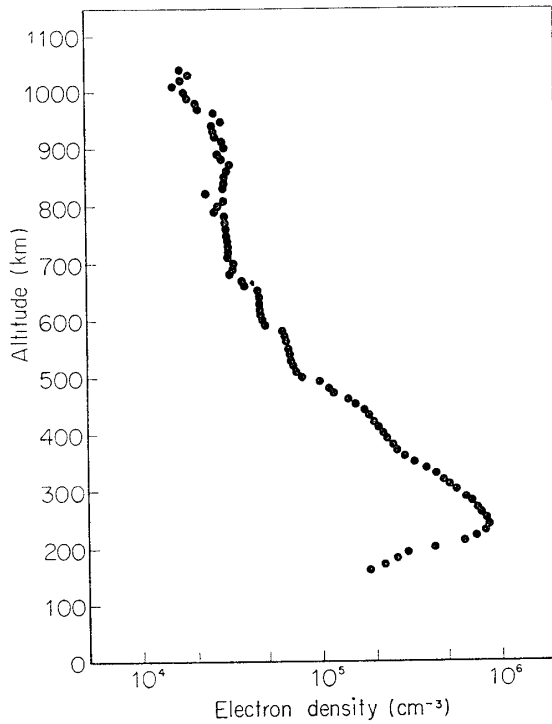
ロケットは 1965 年 1 月 31 日, 14 時 01 分に打ち上げられ, 高度 1040 km に達した. 発



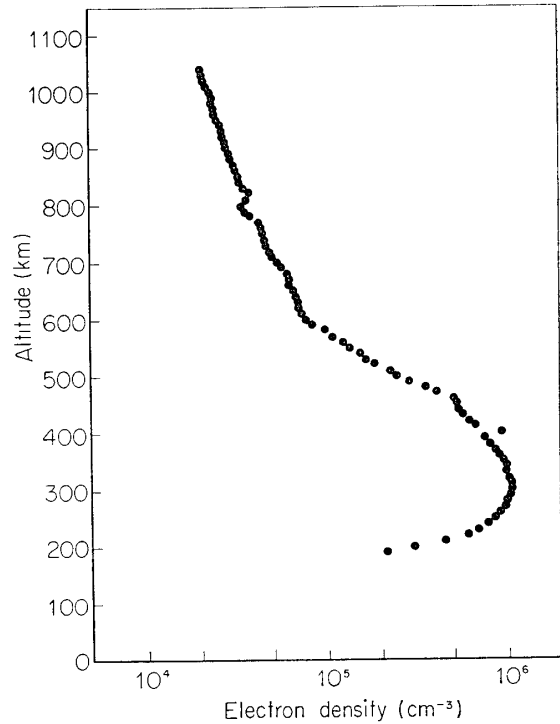
第 11 図 (a) L-3-2 による共振周波数の測定結果 (1965年1月31日, 14時01分, 上昇時)



第 11 図 (b) L-3-2 による共振周波数の測定結果 (1965年1月31日, 14時01分, 下降時)



第 12 図 (a) L-3-2 による電子密度の測定結果 (1965年1月31日, 14時01分, 上昇時)



第 13 図 (b) L-3-2 による電子密度の測定結果 (1965年1月31日, 14時01分, 下降時)

射時の衝撃によりイオン密度測定器が故障したと思われ、イオン密度測定は不可能であった。

電子密度は高度 160~1040km まで観測された。第 11 図 (a), (b) にはレゾナンス・プローブの共振周波数および高度の関係を示してある。同図 (b) の約 600km 以下の三つの枝はロケットのかなり大きな歳差運動による影響であろうと思われる。第 12 図 (a), (b) には共振周波数から計算によって求めた電子密度の高度分布を示してある。この計算において共振周波数プロットの各高度の最大値すなわち包絡線を用いてある。同図 (a), (b) とともに約 800km 以上では約 $2 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ の一定値を有し、磁気圏に連係していることを示している。

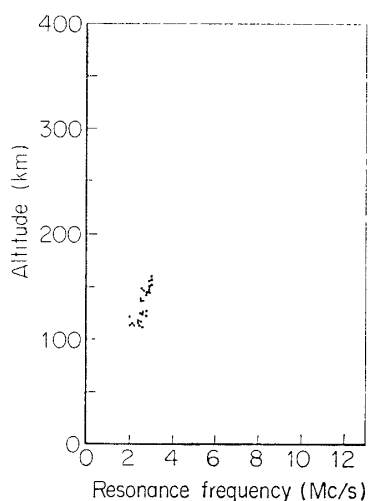
3.4. K-9M-7

イオン密度は測定器の故障により測定ができなかった。

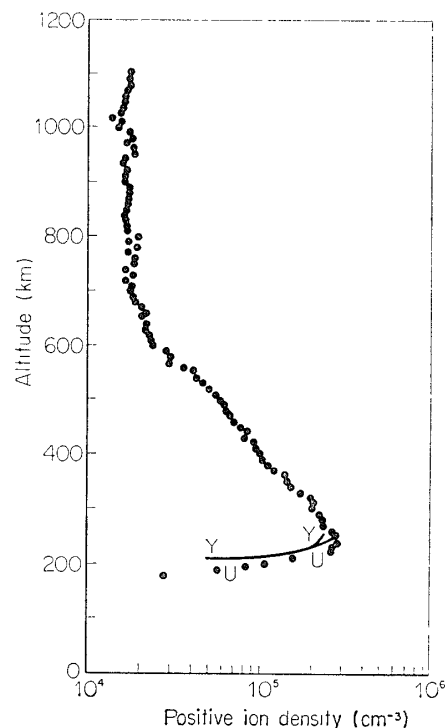
電子密度は 1965 年 2 月 6 日, 14 時 01 分に高度 107~160km の間観測された。その結果は第 13 図に示されている。横軸はレゾナンス・プローブの共振周波数を示す。測定器の一部破損により、電子密度高度分布は全飛しょう行程のうち、上昇時の低部のみしか得られなかった。

3.5. L-3-3

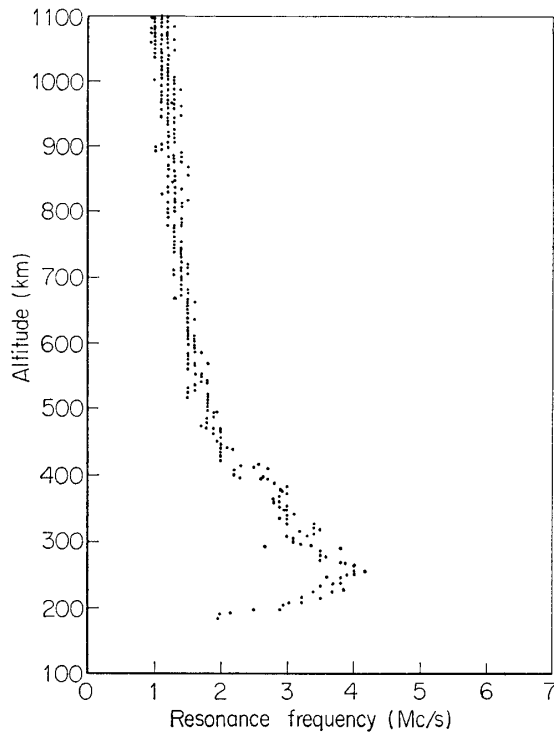
1965 年 3 月 18 日, 19 時 07 分に高度 171~1100km の間正イオン密度が観測された。その結果は第 14 図に示されている。この結果は電子密度と同様に、IQSY 期間中わが国で得



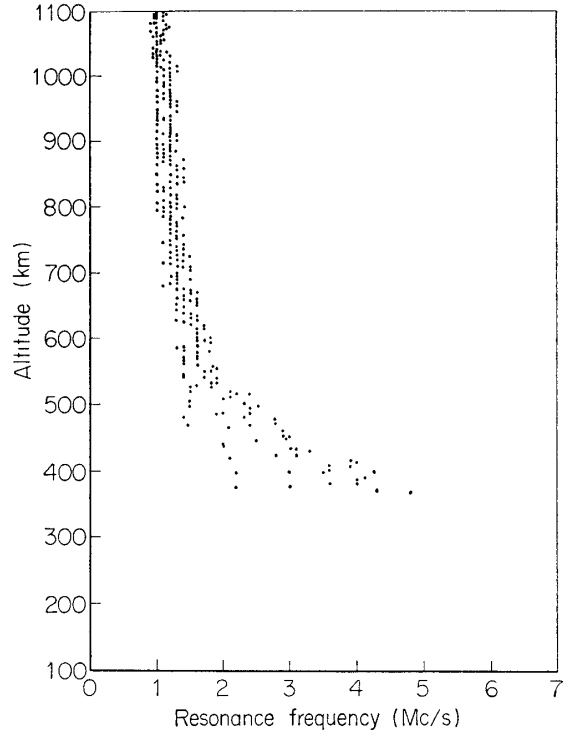
第 13 図 K-9M-7 による共振周波数の測定結果 (1965 年 2 月 6 日, 14 時 01 分, 上昇時)



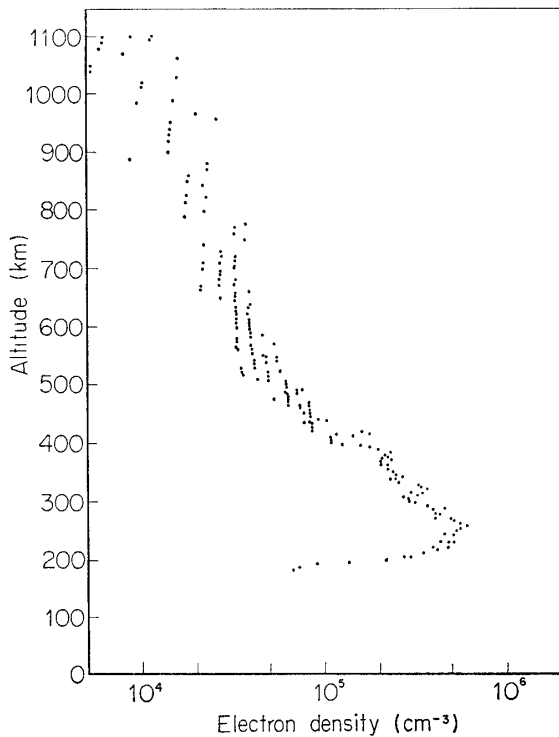
第 14 図 L-3-3 による正イオン密度の測定結果 (1965 年 3 月 18 日, 19 時 07 分, 上昇時)



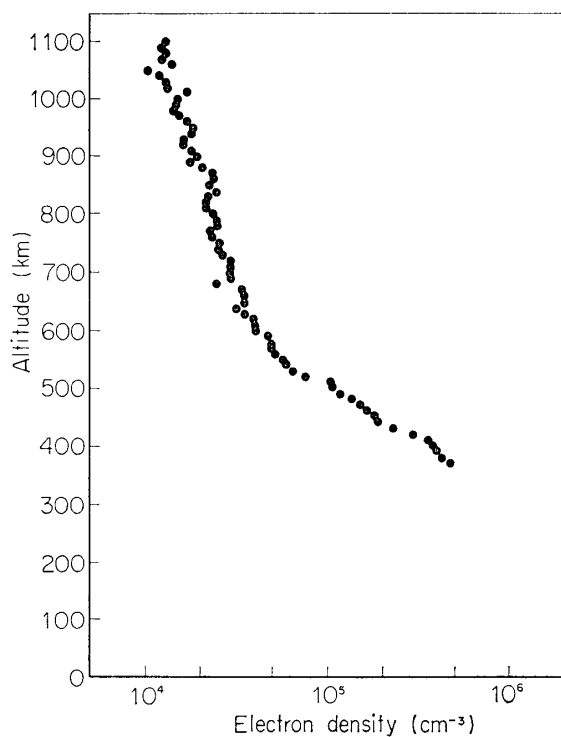
第15図(a) L-3-3による共振周波数の測定結果(1965年3月18日, 19時07分, 上昇時)



第15図(b) L-3-3による共振周波数の測定結果(1965年3月18日, 19時07分, 下降時)



第16図(a) L-3-3による電子密度の測定結果(1965年3月18日, 19時07分, 上昇時)



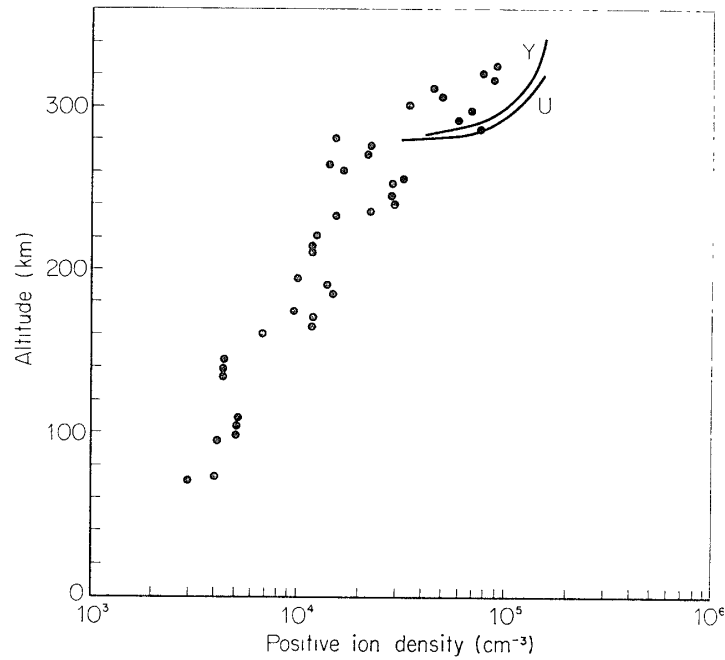
第16図(b) L-3-3による電子密度の測定結果(1965年3月18日, 19時07分, 下降時)

られた最高々度の正イオン密度観測である。

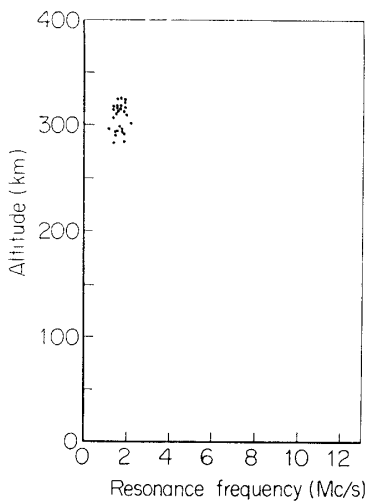
また同時に高度 183~1100km の間電子密度が測定され、第 15 図 (a), (b) にレゾナンス・プローブの共振周波数の測定の結果を示してある。また第 16 図 (a), (b) には電子密度の高度分布を示してある。第 12 図および第 16 図 (a), (b) とともに約 700km 以上では $(1\sim3)\times 10^4\text{cm}^{-3}$ のほぼ一定値を有し磁気圏に連係していることを示している。

3.6. K-9M-8

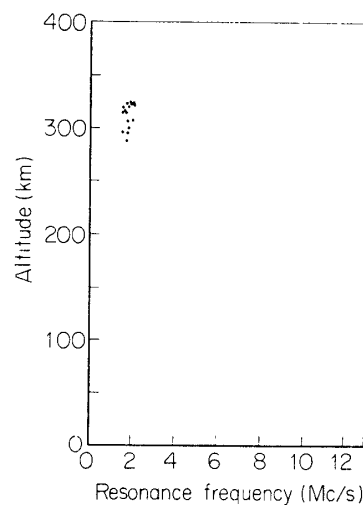
1965 年 3 月 25 日, 20 時 21 分に高度 71~324km の間正イオン密度が観測された。この



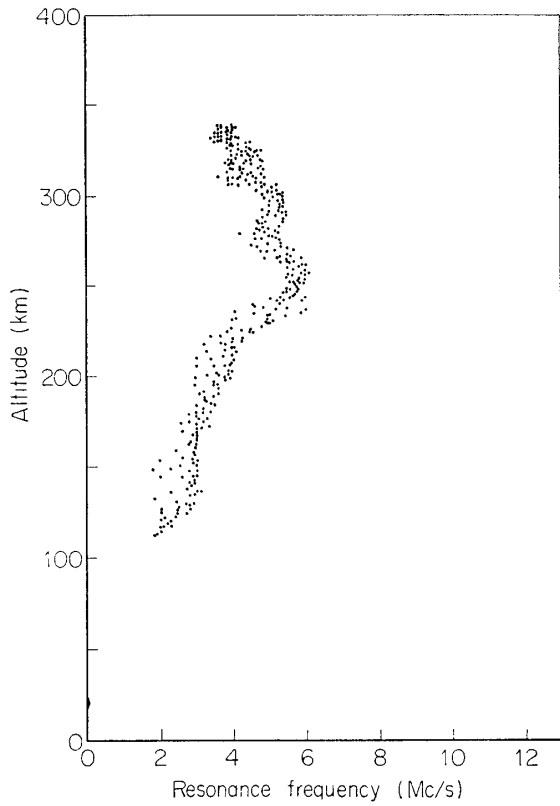
第 17 図 K-9M-8 による正イオン密度の測定結果 (1965 年 3 月 25 日, 20 時 21 分, 上昇時)



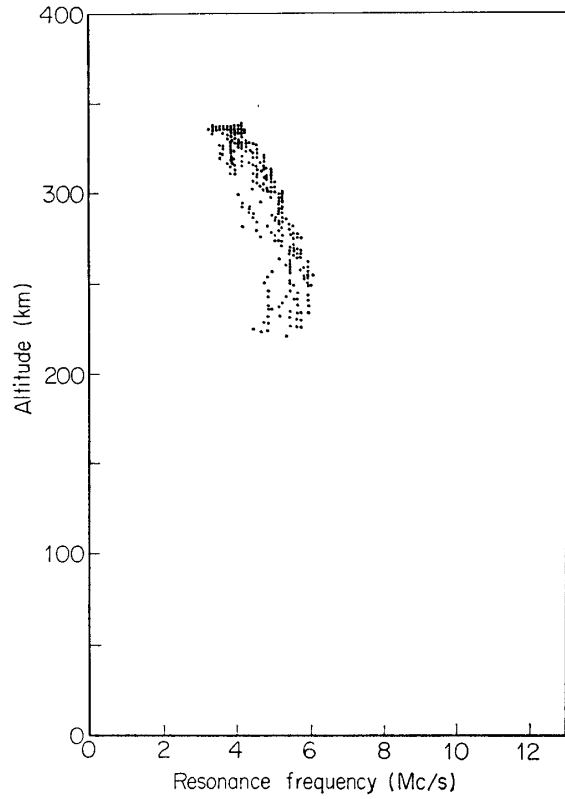
第 18 図 (a) K-9M-8 による共振周波数の観測結果 (1965 年 3 月 25 日, 20 時 21 分, 上昇時)



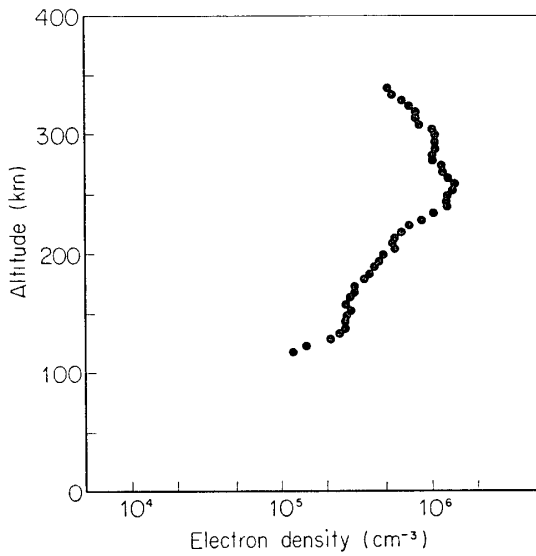
第 18 図 (b) K-9M-8 による共振周波数の観測結果 (1965 年 3 月 25 日, 20 時 21 分, 上昇時)



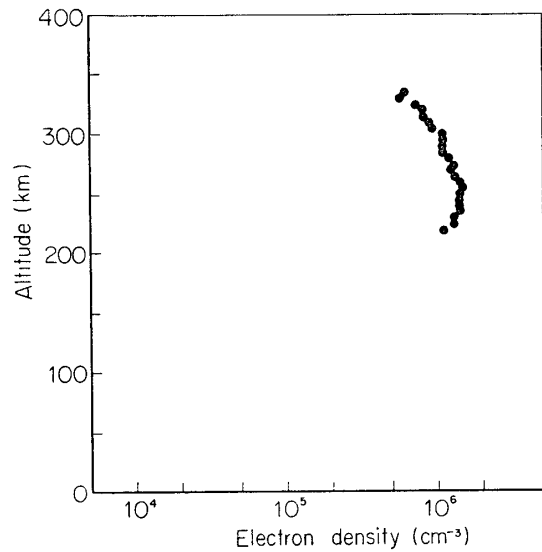
第 19 図 (a) K-9M-9による共振周波数の測定結果 (1965年3月27日, 20時01分, 上昇時)



第 19 図 (b) K-9M-9による共振周波数の測定結果 (1965年3月27日, 14時01分, 下降時)



第 20 図 (a) K-9M-9による電子密度の測定結果 (1965年3月27日, 14時01分, 上昇時)



第 20 図 (b) K-9M-9による電子密度の観測結果 (1965年3月27日, 14時01分, 下降時)

結果は第 17 図に示されている。以下述べる電子密度測定に対して、正イオン密度測定では夜間にもかかわらず、広範囲な密度分布が得られた。同図において $5 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ はほとんど解析操作の限界にあった。全体にわたってのかなりのばらつきは、低密度まで解析したこと起因するものと推定される。最高高度 324km は地上からの電離層観測と比較すれば、ほとんど最大電子密度の高度に等しいことがわかる。

一方電子密度は高度 282~324km の間しか測定できなかった。第 18 図 (a), (b) にはレゾナンス・プローブの共振周波数の測定結果を示してある。同図 (a), (b) ともに低電子密度のためあるいは測定器の感度不足のためにあまり良好な結果を示していない。

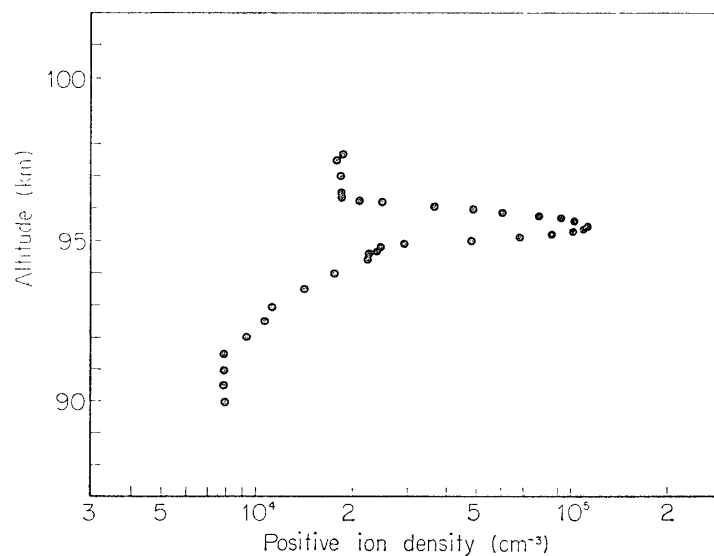
3.7. K-9M-9

正イオン密度は測定器の故障のため測定できなかった。

電子密度は 1965 年 3 月 27 日, 14 時 01 分に高度 112~335km の間観測された。第 19 図 (a), (b) にはレゾナンス・プローブの共振周波数の測定結果を示し、それから求めた電子密度の結果は第 20 図 (a), (b) に示されている。

3.8. K-8-12

1965 年 7 月 16 日, 19 時 50 分に高度 94.8~96.4km の間夜間 E_s 層の正イオン密度がグリッド印加電圧の固定方式のイオン・トラップによって観測された。この場合測定器の設定感度の不足のために、全飛しょう行程において良好な正イオン密度の高度分布は得られなかったが、固定電圧方式のために連続測定ができ、夜間 E_s 層の微細構造を測定することができた。その結果は第 21 図に示されている。同図によると、この場合の E_s 層は 94.8~96.2km の間に存在し、最大正イオン密度は 95.5km に現われている。この観測方式はイオン密度の相対値をもたらすので、数密度の絶対値は山川における地上からの電離層観測を参考にした。また E_s 層のイオン密度は静穏時の E 層のその約 6.2 倍であることがわかる。

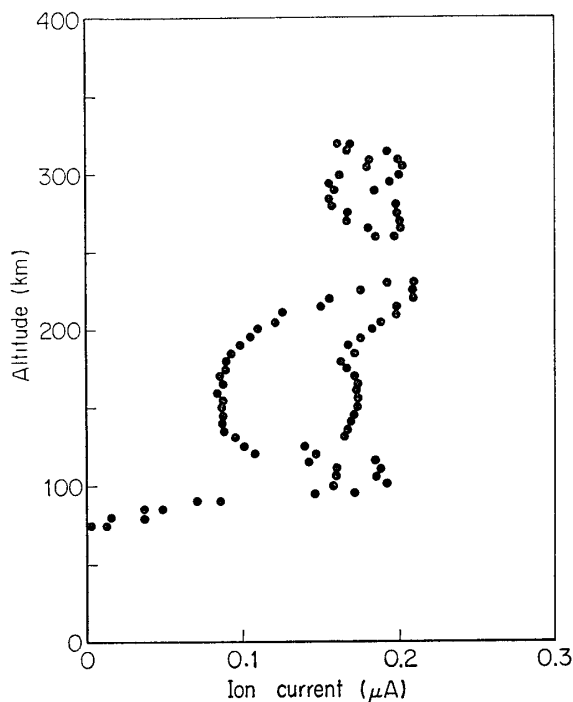


第 21 図 K-8-12 による正イオン密度の観測結果
(1965 年 7 月 16 日, 19 時 50 分, 上昇時)

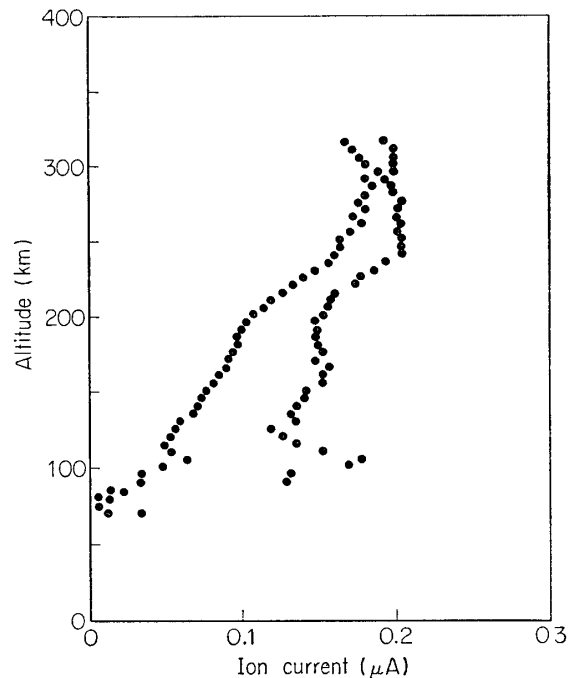
電子密度に関しては高度 95.4 km にレゾナンス波形のピークが現われ、それは 1.45 Mc/s でこれから算出された電子密度は約 $8 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ であった。下降時の部分は波形が三角波状になり、ピークがまったく現われなかった。そのほかの部分も同じように三角波状に記録を示している。ただし雑音的な成分は含んでいない。この原因としては低密度のプラズマ ($< 10^3 \sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$) のために現在用いているレゾナンス・プローブがこの測定範囲では不適當であることを示している。ゆえに E_s 層のみが測れたことになる。

3.9. K-9M-13

1965年7月27日、12時10分に高度 75~320 km の間正イオン密度が球形網状イオン・プローブの固定電圧方式により観測された。それゆえ絶対値の測定はできなく、相対値が測定され、同時に搭載されたインピーダンス・プローブの結果を参照して規格化された。まずイオン電流の値は第 22 図 (a), (b) に示されている同図 (a), (b) における二つの曲

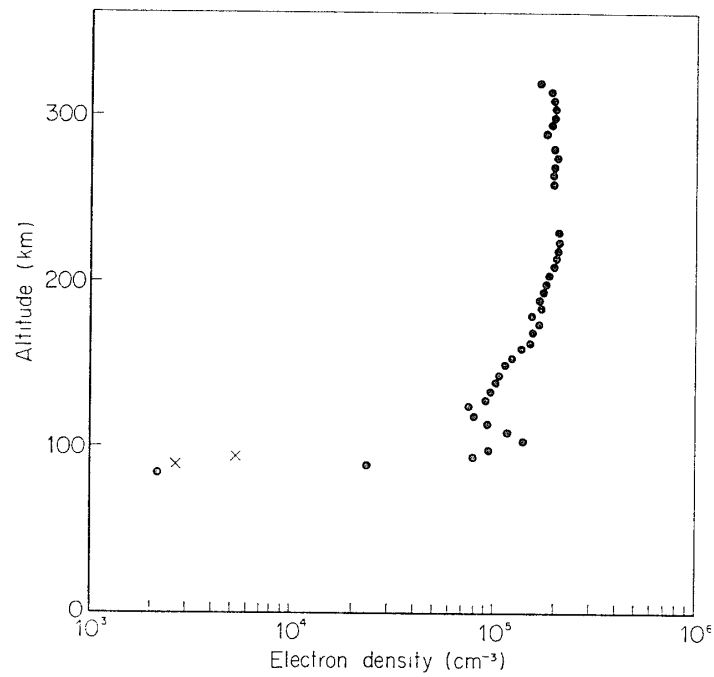


第 22 図 (a) K-9M-13 によるプローブ・イオン電流の測定結果 (1965 年 7 月 27 日, 12 時 10 分, 上昇時)

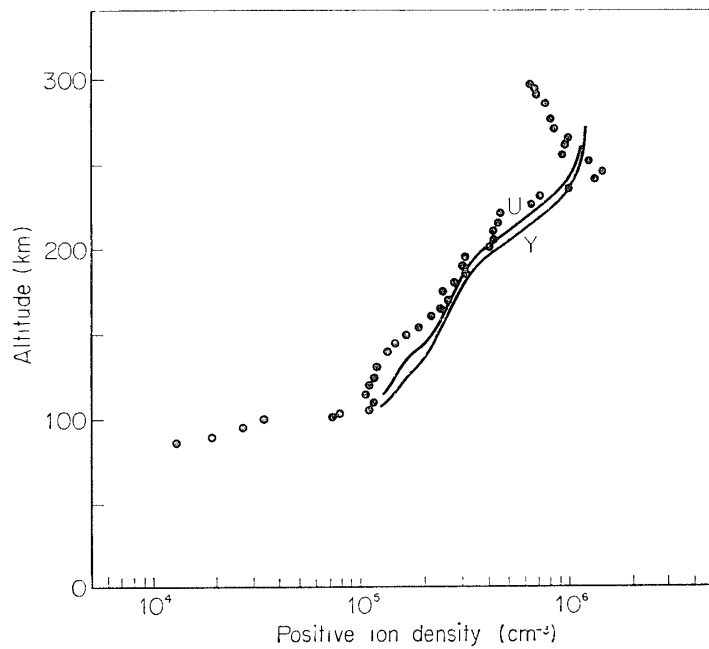


第 22 図 (b) K-9M-13 によるプローブ・イオン電流の測定結果 (1965 年 7 月 27 日, 12 時 10 分, 下降時)

線はロケットのスピンおよび歳差運動に伴う変化の最大と最小を示す。この場合小さい値を示す曲線はロケット本体の影響を受けているものと思われる。第 23 図はイオン電流の大きい値を示す曲線から求めたイオン密度高度分布を示す。同図中、黒点はイオン密度計算の際“軌道運動領域”の計算によって結果を求め、掛印は“多数回衝突領域”の計算によって結果を求めた。これはシースの大きさとイオンの平均自由行程の大小によって計算の方法が異なるからである[5]。



第 23 図 K-9M-13 による電子密度の測定結果
(1965 年 7 月 27 日, 12 時 10 分, 上昇時)



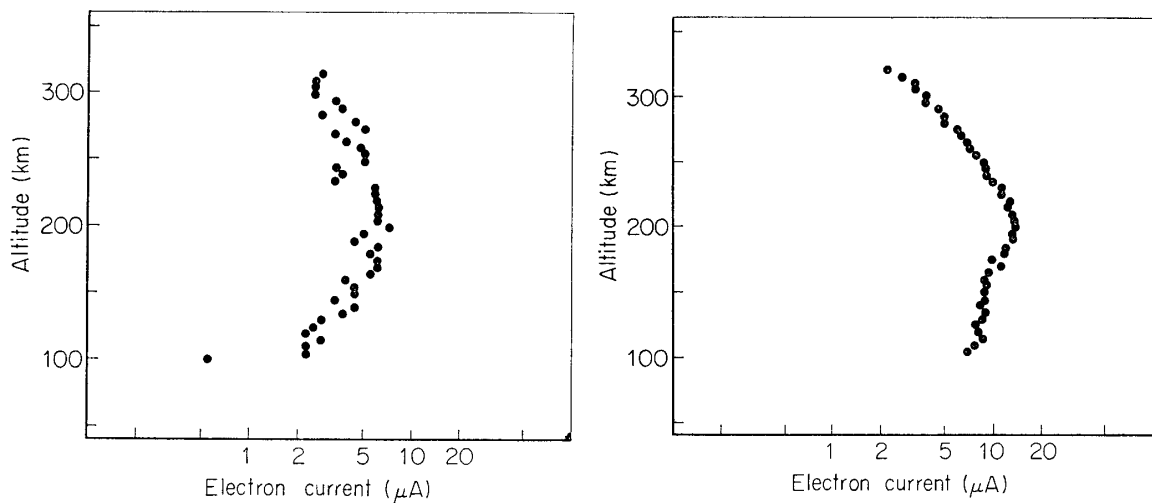
第 24 図 K-9M-14 による正イオン密度の測定結果
(1965 年 10 月 4 日, 12 時 00 分, 上昇時)

3.10. K-9M-14

1965年10月4日、12時00分に高度87~299kmの間正イオン密度がイオン・トラップにより観測された。このロケットは上昇時に傾角40°におよぶ歳差運動を3周期強行なったが、歳差運動による補正も行ない、その結果は第24図に示されている。同図では正午におけるF領域最大正イオン密度に加えて、E領域最大正イオン密度も明瞭に示されている。

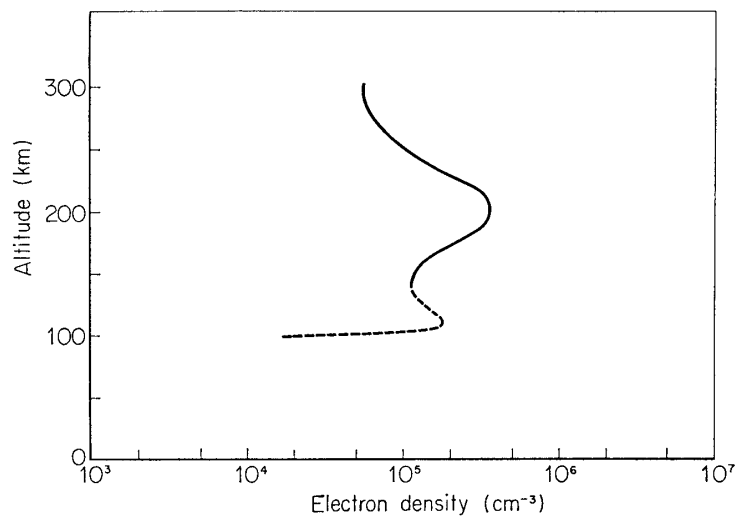
3.11. K-9M-16

1965年12月13日、15時20分に高度100~318kmの間電子密度が観測された。ペイロードの関係上正の固定電圧を印加するエレクトロン・プローブを搭載した。第25図(a)、(b)には高度に対する電子電流を示してある。これによると下降時の電流は上昇時の電流



第25図(a) K-9M-16によるプローブ電子電流の測定結果(1965年12月13日、15時20分、上昇時)

第25図(b) K-9M-16によるプローブ電子電流の測定結果(1965年12月13日、15時20分、上昇時)



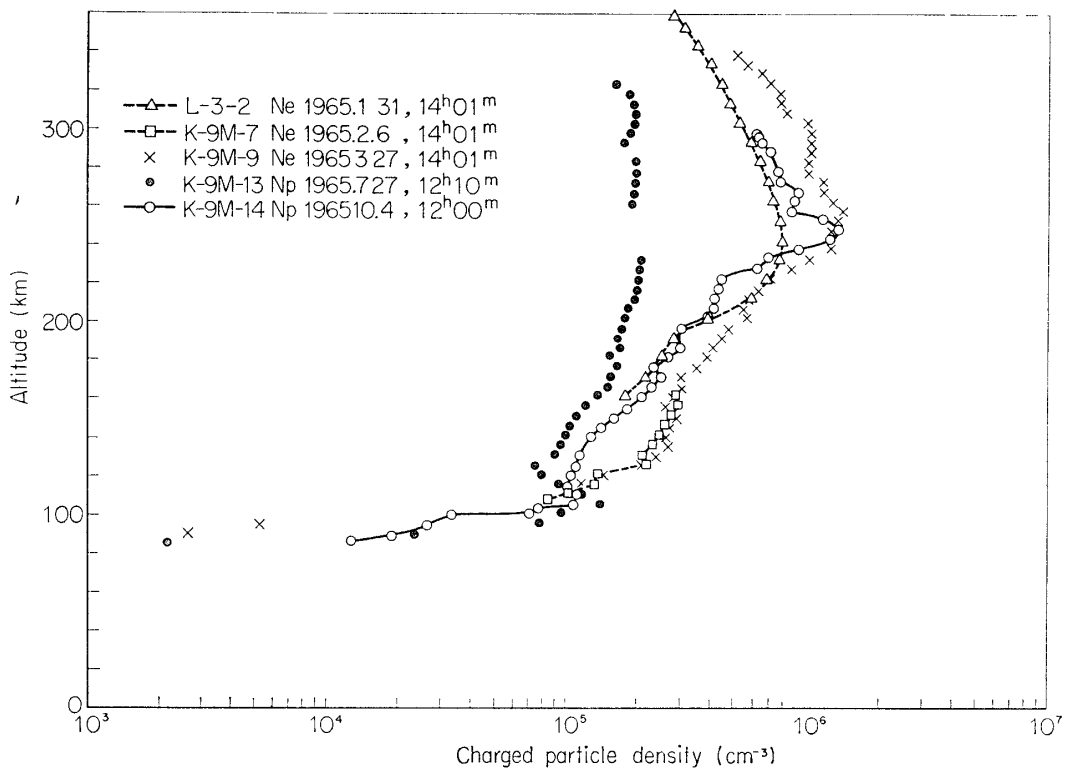
第26図 K-9M-16による電子密度観測結果(1965年12月13日、15時20分、上昇時)

の約 1/4 にも減少している。第 26 図は上昇時の電流値から求められた電子密度の測定結果である。この計算の過程に必要なロケット本体の電位および電子温度の値については K-9M-14 の結果を用いた。計算の過程においてこのような仮定を用いたので、高度 100km 付近の電子密度の極大はさらに検討を要する。

4. 考 察

IQSY 期間中行なわれた荷電粒子密度の観測で良好な結果が得られた、L-3-2, 3; K-9M-7, 8, 9, 13, 14 および K-8-12 の 8 機について考察を行なう。

第 27 図は 12 時ないし 14 時に打上げられた 5 機のロケットによって測定された電子密度および正イオン密度の高度分布を示してある。同図によると荷電粒子の高度分布は三つの



第 27 図 荷電粒子密度高度分布の比較

型にわけられ、(i) K-9M-13 の場合、(ii) K-9M-14 および L-3-2 の場合、(iii) K-9M-7 および K-9M-9 の場合である。E 領域においては (i) K-9M-13 と (ii) K-9M-14, L-3-2 とでは 100km 付近の最大密度およびプロファイルは近似しているが、(iii) K-9M-7, 9 は約 130km において E_s 層の最大密度を有している。F 領域においては、(i) K-9M-13 の場合のみが明瞭な最大密度を示さないが他の (ii), (iii) の場合は明瞭な最大密度を示し、その高度は 240~250km である。次に第 6 表にはそれぞれのロケット打上げ時の K_p および 2 日前から 2 日後までの 5 日間の ΣK_p を示してある。なおこの表には 8 機全部についてまとめてある。これによると、(ii) K-9M-14, L-3-2 の場合は静穏な状態で

第 6 表 地磁気活動度

Rocket	K-9M-13	K-9M-14	L-3-2	K-9M-7	K-9M-9	L-3-3	K-9M-8	K-8-12	
Date(1965)	Jul. 27	Oct. 4	Jan. 31	Feb. 6	Mar. 27	Mar. 18	Mar. 25	Jul. 16	
Time	12h 10m	12h 00m	14h 01m	14h 01m	14h 01m	19h 07m	20h 21m	19h 50m	
K_p	2 _o	0 _o	0 _o	5 ₋	2 _o	0 _o	2 ₊	1 ₋	
ΣK_p	-2day	11 ₊	24 ₊	9 ₊	19 _o	25 _o	8 _o	30 ₋	8 _o
	-1day	7 ₋	6 ₋	8 ₊	11 ₋	21 _o	10 ₊	20 _o	17 ₊
	The day	16 _o	1 ₊	5 ₊	20 ₋	17 _o	2 ₊	25 _o	7 ₋
	+1day	23 _o	14 _o	7 _o	32 _o	9 ₊	8 ₋	21 _o	4 ₋
	+2day	20 _o	3 ₋	5 ₋	18 _o	12 ₊	10 ₊	17 _o	9 ₊
Remark	(Disturbed)	Quiet	Quiet	Disturbed	(Disturbed)	Quiet	(Disturbed)	Quiet	

典型的な荷電粒子密度の高度分布を示していると考えられる。他の場合は ΣK_p の値がかなり大きくかく乱に近い状態であり、それに関連して (i) K-9M-13 の場合には F 領域において明瞭な最大密度を示さなく、一方、(iii) K-9M-7, 9 の場合は E 領域の密度が増加しているものと思われる。一方、山川観測所における Ionogram によれば (i) K-9M-13 の場合は f_oF_2 は 08 時頃より 24 時までほとんど 6Mc/s 前後で一定値を示したままであった。(ii) K-9M-14 の場合は、 f_oF_2 は三つのピークがあって、12 時前後は平均 (8.6Mc/s) より高く 10.6Mc/s を示していた。また f_oF_1 および f_oE は通常の変化を示していた。L-3-2 の場合は、通常の日変化を示し f_oF_2 の最大値は 7Mc/s であった。(iii) K-9M-7, 9 に関しては Ionogram 通常の日変化を示し、 f_oF_2 の最大値は K-9M-7 においては 8Mc/s, K-9M-9 においては 11Mc/s を示し、これは月平均の 9.7Mc/s より高い値を示していた。以上のほかに大気温度による季節変化あるいは太陽ふく射強度自身の変化による影響を考察しなければならないと思われる。

次に、L-3-3, K-9M-8, K-8-12 の 3 機のロケットによる正イオン密度の観測が 19~20 時頃行なわれた。前二者はともに 3 月に行なわれているので、これを比較することは興味がある。また K-8-12 による観測は 7 月に行なわれているが、E_s 層単独の観測であるから一緒にして第 28 図に示してある。L-3-3 と K-9M-8 は同年同月で地方時は 1 時間程度異なり、イオンの生成率が小さくなり、電子との再結合によって、正イオン密度が減少したときで、このときの高度分布の変化は興味がある。それぞれの場合の K_p および ΣK_p は第 6 表の通りで、L-3-3 の場合は静穏、K-9M-8 の場合はかなり擾乱である。また両者の山川における f_oF_2 プロットの日変化によれば L-3-3 の場合は夜間の定常値に落ち着く以前であり、K-9M-8 の場合は定常値に落ち着いた以後である。また Ionogram の様子は両者とも平均的な変化を示していて Ionogram からみた電離層の状態は静穏と考えられる。

また K-8-12 により観測された E_s 層は薄板状構造を示し、基底部と尖端部のイオン密度は一けた程度の差を示している。

L-3-2 および L-3-3 ロケットによって高度 1000 km 以上にもおよぶ電子密度観測が上昇時、下降時ともレゾナンス・プローブによって順調に行なわれたので、両者の結果を比較することは大変興味がある。上昇時においては両者とも 600 km ないし 700 km 以上では電子密度はほぼ等しいが、それ以下の高度では L-3-3 の場合の電子密度は L-3-2 の場合に比べて一定の割合で小さくなっている。また最大電子密度は両者とも約 250 km の高度に現われており、さらに電子密度の高度に関する減少率は約 500 km において急激に変わっている。次に下降時では両者とも約 800 km 以上ではほぼ相等しいがそれ以下では上昇時の場合と同様 L-3-3 の場合は小さくなっている。最大電子密度は約 350 km において現われており、これは上昇時に比べて 100 km も高くなっている。

次に L-3-2, L-3-3 の各々において下降時の電子密度は上昇時のそれよりかなり低くなっている。これはラムダ型ロケットの場合発射点と落下点とでは 1800 km も異なるので地磁気緯度としては赤道へ 10° 以上も変化しました地方時も約 1 時おくれるので地磁気緯度の効果地方時による変化の二つがかさなった結果であると考えられる。最後に第 7 表にはそれぞれのロケットによる電子密度プロファイルから求めた Scale height H , O^+ から He^+ へ移る遷移高度, 平均温度, 最大電子密度, F 層ピークの高度を一括して示してある。

5. 結 言

IQSY 期間中, K-9M-4 を除いて 10 回にわたり, ロケットによる電離層荷電粒子密度の観測が行なわれた。ロケットおよびパイロードの関係上 L-3-1 の側面プローブ, K-9M-16 のエレクトロン・プローブによる観測の結果は良好でなかったが, ほかの 8 機については良好な結果が得られ, それらから得られた地球物理学的解釈は考察において述べたごとく, かなり興味ある事実が示された。さらに今後, 測定器の改良を重ねることによって電離層物理学研究発展に大きな貢献をすることができると思われる。

謝 辞

電離層直接観測において多大の協力をいただいた横河・ヒューレット・パッカー K. K. の方々, 郵政省電波研究所山川電波観測所, 第一電波課, 電離気体研究室の方々に対して深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- [1] Aono, Y., Hirao, K. and Miyazaki, S.: "Rocket Observation of Ion Density in the Ionosphere" J. Radio Res. Labs., Vol. 8, pp. 441-451 (1961).
- [2] Aono, Y., Hirao, K. and Miyazaki, S.: "Positive Ion Density, Electron Density and Electron Temperature in the Ionosphere by the Kappa-8-5 and 6 Rockats", J. Radio Res. Labs., Vol. 8, pp. 453-465 (1961).
- [3] Aono, Y., Hirao, K. and Miyazaki, S.: "Rocket Observation of Ion Density, Electron Density and Electron Temperature in the Ionosphere" J. Radio Res. Labs., Vol. 9, pp. 407-419 (1962).
- [4] Hirao, K. and Miyazaki, S.: "Rocket-borne Ionospheric Direct-Sounding Instruments", J. Radio

Res. Labs., Vol. 12, No. 64, pp. 357-380 (1965).

- [5] Dote, T., Takayama, K. and Ichimiya, T.: "Analysis of Probe Characteristics in Drifting Plasma", J. Phys. Soc. Japan, Vol. 17, No. 1, pp. 174-183 (1962).

質 議 討 論

前田(坦): 電離層の電子密度ロケット観測の結果は夜間, 特に夜中から夜明けまでの間が大変少ない. 電離層の生成に関しても, また電気力学的行動の研究にも非常に大切なため, 今後夜間の電子密度測定をもう少しやってほしい.

平尾: 講演者は時間の都合で秋田実験の結果を話さなかったが, K-8-3, K-8-4 によるイオン密度の観測は当時世界で初めてはっきりしたプロフィールを与えたもので, その価値は大きいと思う.