

# K-9M-20 ロケットによる電離層観測

平尾邦雄・宮崎茂\*

Direct Observation of the Ionosphere with Sounding Rocket K-9M-20

By

Kunio HIRAO and Shigeru MIYAZAKI

**Abstract:** The sounding rocket K-9M-20 was fired at 17 h 25 m J. S. T. on the 20 th of October, 1966 from the Kagoshima Space Center. The profile of electron density obtained by resonance probe method, ion density by Langmuir probe method and electron temperature by AC probe method were observed for the altitude of 358 km in the twilight ionosphere. The observational results and discussions were presented in this paper.

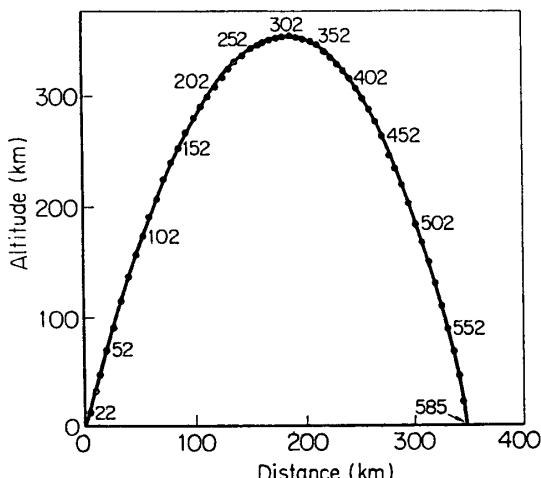
## 概要

昭和 41 年 10 月 20 日 17 時 25 分に鹿児島県内之浦の宇宙空間観測所（東経  $131^{\circ}04'45''$ ，北緯  $31^{\circ}15'00''$ ，地磁気緯度  $19.8^{\circ}$ ）において K-9M-20 ロケットが発射され，薄暮時電離層の観測を行なった。測定項目はレゾナンス・プローブによる電子密度，Langmuir プローブによる正イオン密度，交流プローブによる電子温度の 3 項目であり，この諸量を高度約 360 km まで測定した。

## 1. 緒言

高度数十 km から数千 km 以上に広がって存在する電離層は電波伝播の問題に関して重要なばかりでなく，宇宙空間において起こる諸現象に密接な関連をもち，種々の相互作用をもつたためにその基礎量の測定は電離層物理の研究はもとより，いわゆる宇宙空間の研究にとって重要である。さらにまた電離層の生成・消滅は太陽活動と密接な関係があるので太陽活動度による変化，季節変化，日変化の電離層の状態を長期にわたり，系統的に観測することが必要である。

今回の電離層の測定項目は電子密度，正イオン密度，電子温度の 3 項目であり，薄暮時における高度 358 km までの電離層の状態を観測した。さらに今回搭載した測定器は，第 1 号科学衛星に搭載することを目的として改良されたものとほとんど同じもので，その動作のテストおよびその測定結果を従来の方式のものと比較検討した。第 1 表にはロケット



第 1 図 K-9M-20 飛しょう曲線

\* 郵政省電波研究所

による電離層観測の諸元が示されている。第1図はK-9M-20の飛しょう軌跡を示してある。同図中曲線上の数字は発射後の秒数を示してある。

第1表 電離層直接観測

機種	K-9M-20
発射年月日	41. 10. 20
発射時刻	17:25
発射角	79°
発射方向(北から右廻り)	145°
最高到達高度	358 km
開頭高度	70 km
開頭時刻(発射後)	52 sec.
飛しょう時間	585 sec.
水平距離	346 km
プローブ数	3
測定項目	正イオン密度 電子密度 電子温度
備考	プローブ露出 55 sec. 78 km 逆傘型方式

## 2. 測定器

ここでは正イオン密度、電子密度および電子温度の測定法の概要および測定器について述べる[1]。

### 2.1 正イオン密度

Langmuir プローブ法を用いた。すなわちプローブに一定の負の直流電圧を印加して、プローブに流れる飽和イオン電流を測定して正イオン密度を求める。

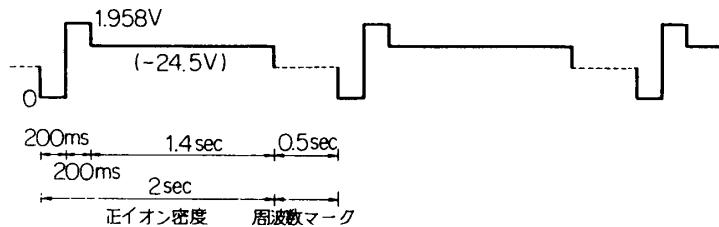
諸元

プローブ	直径 2 cm の球形網型、柄の長さ 47 cm
直流印加電圧	-24.5 V
繰り返し周期	2 sec
増幅器入力抵抗	6.05 MΩ
増幅器利得	2.0 倍
基準電圧	0 V, 0.979 V の 2 点
テレメータ・チャンネル	ch. 9 (60c/s), レゾナンス・プローブ用周波数マークと共に用
出力波形	第2図に示すごとくである。

なお温度係数を小さくするために従来の単一増幅器のかわりに差動増幅器を使用した。その結果温度 0~50°C に対して出力ドリフトは 20~30 mV 以内である。

### 2.2 電子密度

レゾナンス・プローブ法を用いた。すなわちプローブに可変掃引高周波電圧を印加し、プローブ



第2図 測定波形

ロープ高周波電界とプラズマおよびシースとの相互作用により、電子プラズマ周波数付近において共鳴現象が起こる。この共振周波数から計算によって電子密度を求める。なお今回のレゾナンス・プローブ法は従来のプローブ直流出力の全波形を出すほかにレゾナンス・ピークを自動的に追跡するホールド回路の出力も出してあり、その両者を比較することになった。

## 諸元

プローブ	直径 2 cm の球形、柄の長さ 47 cm
印加掃引周波数	0~13 Mc/s
印加電圧	0.2 Vpeak (1 Mc/s~5 Mc/s, 9~10 Mc/s 附近は多少増加する)
繰り返し周期	500 ms
増幅器	対数増幅、入力 0.01 V まで直線増幅で利得 70 倍、それ以上は対数圧縮する。
基準電圧	なし
テレメータ・チャンネル	レゾナンス・プローブ・ホールド ch. 5 (20 c/s) レゾナンス・プローブ ch. 15 (450 c/s) 周波数マーク ch. 9 (60 c/s) (ただし正イオン密度と共に用)

なおレゾナンス・プローブのホールド回路については印加高周波を低い方から高い方に掃引するとき、レゾナンス・ピークの立ち下がった点においてシュミット回路によるパルス発生器により、パルスを作り、そのパルスを用いて、可変掃引発振器の周波数をきるのこぎり歯状波電圧 (0~13 Mc/s に対し 0~12V) のコンデンサー充電を OFF にする。そのときのコンデンサーに充電された電圧はとりも直さずレゾナンス・ピークの立ち下がった点の周波数であるから、その電圧をテレメータに送ればよい。なおコンデンサーの電圧の放電は次の周期のレゾナンス・ピークの立ち上りの点において行なう。またレゾナンス・プローブの回路には DC Amp. を多く用い、温度によるドリフトの影響を少なくしている。さらに消費電力も著しく小さくしているのも特徴である。

## 2.3 電子温度

プローブに一定周波数の微小振幅の交流電圧を印加する。そしてプラズマ・シースの非線型性によって生ずる直流電圧を測定することによって電子温度を求める。

## 諸元

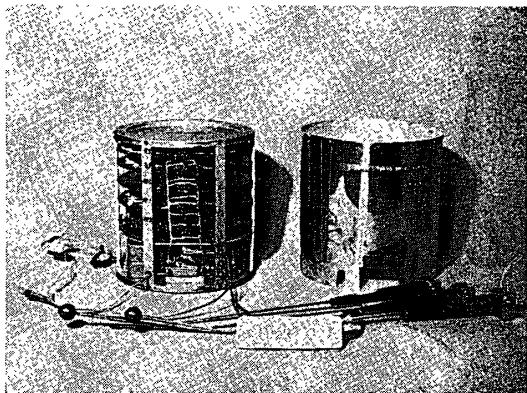
プローブ	直径 2 cm の球形、柄の長さ 47 cm
------	------------------------

印加周波数	30 kc/s
印加電圧	0.2 Vpeak および 0.4 Vpeak
繰り返し周期	5 c/s; 200 ms (80 ms + 80 ms + 40 ms)
增幅器利得	10 倍
基準電圧	0 V (40 ms)
テレメータ・チャンネル	ch. 14 (330 c/s)

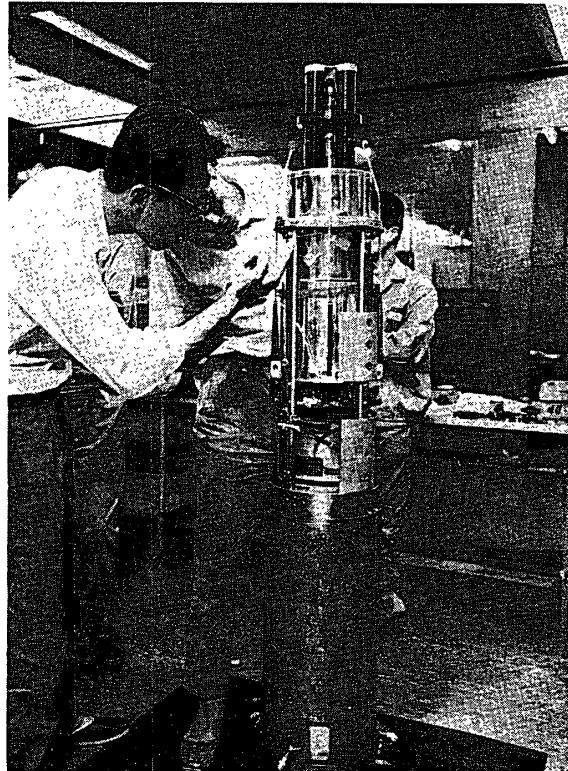
なお、30 kc/s の高周波電圧を 0, 0.2, 0.4 V の 3 段階に切り替えてプローブに印加するのに、従来はラッティング・リレーを用いたが、今回は消費電力を少なくするために、より安定な動作を行なわせるためにダイオードによるスイッチを採用した。

#### 2.4 測定器概要

測定回路はすべて 200 mm $\phi$ , 200 mmh の円筒形の缶の中に収められており、重畳はプローブ系を含めて約 6 kg である。プローブは頭胴部の開頭後 6 秒（設定値）で焼切り法による逆傘型方式である。第 3 図は K-9M-20 に搭載した電離層測定器およびプローブ系を示してある。第 4 図はロケットの頭胴部に搭載機器を格納した状態を示し、第 5 図はプローブなどを突き出した開頭後の状態を示してある。



第3図 K-9M-20 搭載用電離層測定器

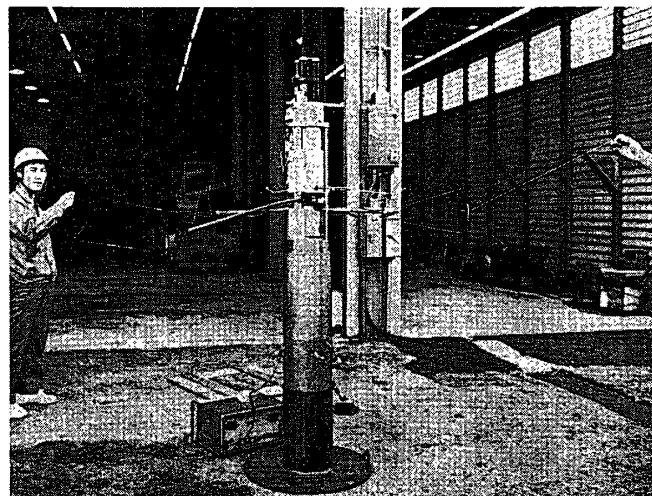


第4図 K-9M-20 頭胴部

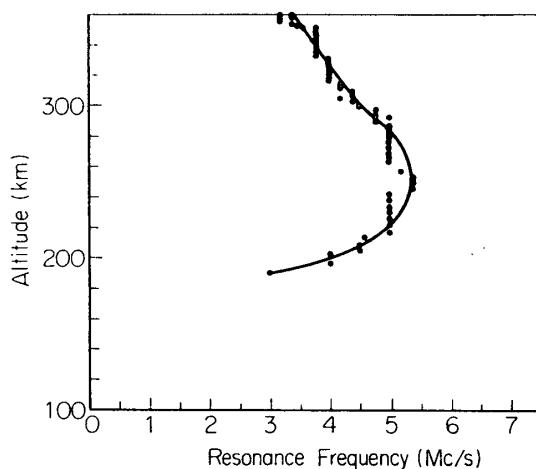
### 3. 観測結果

#### 3.1 電子密度

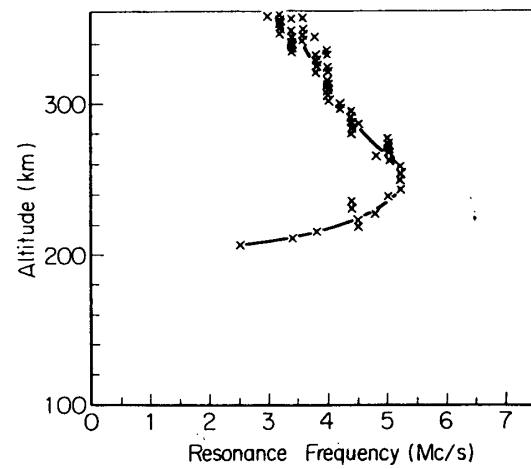
レゾナンス・プローブによって上昇時 190 km～358 km, 下降時 358 km～206 km までレゾナンス・ピークが観測された。実際のデータはかなりレゾナンス・ピークと似た雑音的波形が多くないので低密度の波形は読み取ることができなかった。第 6 図(a), (b) にはレゾナンス・プローブの共振周波数の高度に対する測定結果を示してある。さてプローブの周囲



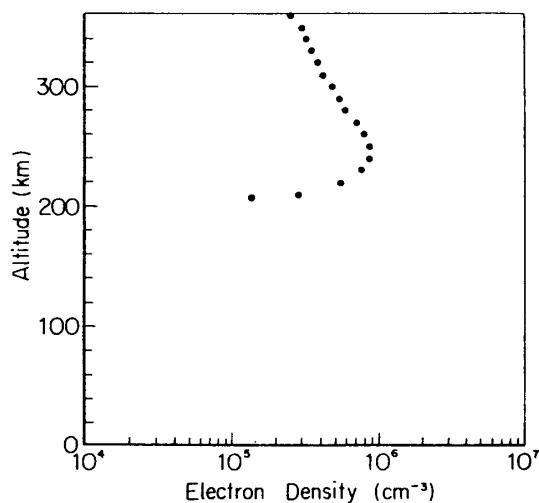
第 5 図 K-9M-20 搭載機器



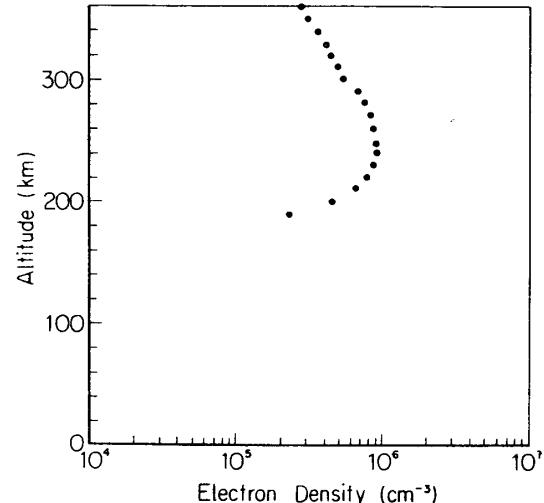
第 6 図(a) K-9M-20 による共振周波数の測定結果（上昇時）



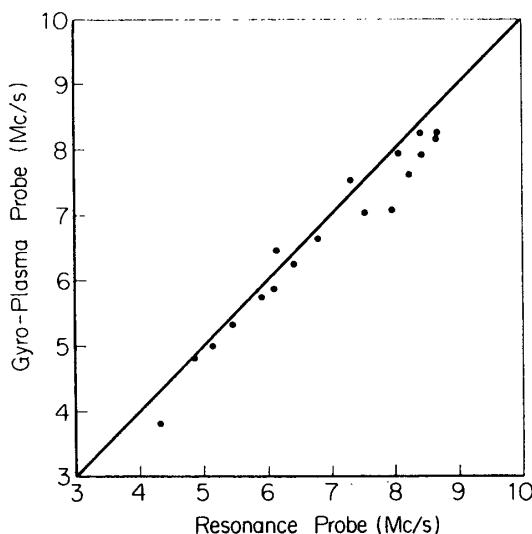
第 6 図(b) K-9M-20 による共振周波数の測定結果（下降時）



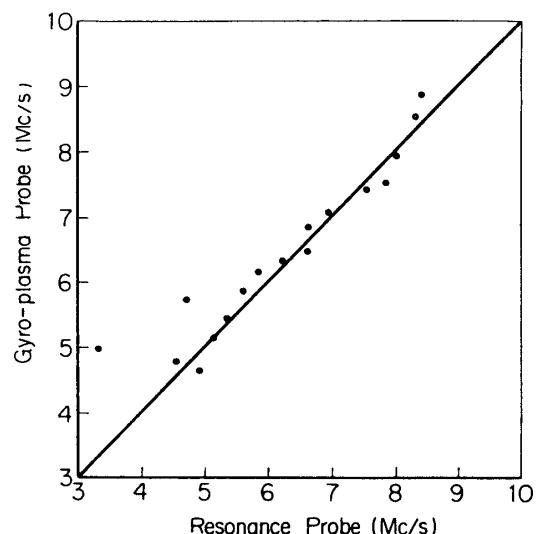
第 7 図(a) K-9M-20 による電子密度の測定結果（上昇時）



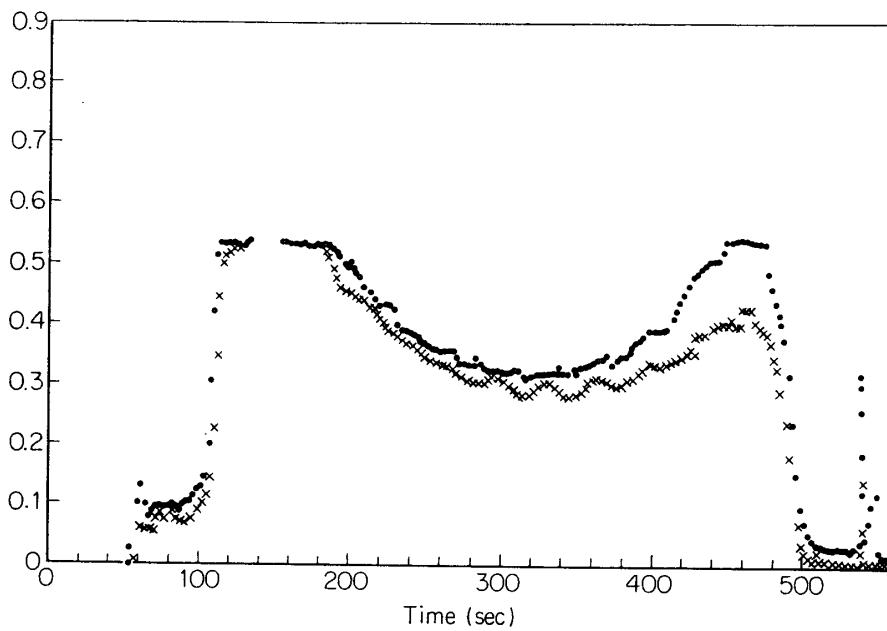
第 7 図(b) K-9M-20 による電子密度の測定結果（下降時）



第8図(a) 共振周波数と電子プラズマ周波数の比(上昇時)



第8図(b) 共振周波数と電子プラズマ周波数の比(下降時)



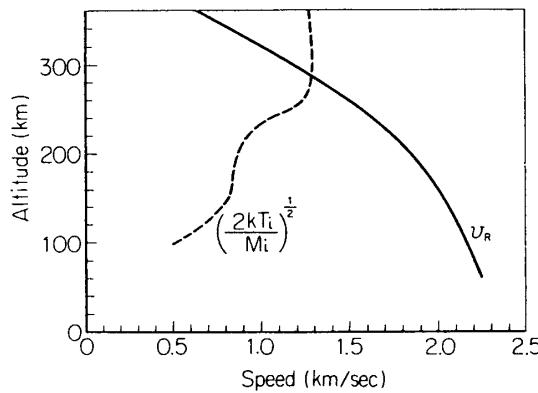
第9図 K-9M-20による正イオン飽和電流の測定結果

にはシースと称する空間電荷層が存在するのでレゾナンス周波数は電子のプラズマ周波数とシースを規定する量(プローブ電位、電子密度、電子温度、イオン質量、イオン温度、ロケットの速度)の関数によって表わされる。よってレゾナンス周波数からこの関係式を用いて電子密度を求める[2][3]。第7図(a),(b)はレゾナンス周波数から求めた電子密度の結果を示してある。またK-9M-20にはジャイロプラズマ・プローブが同時に搭載され、電子密度が求められた[4]。第8図(a),(b)はレゾナンスプローブから求めたプラズマ周波数とジャイロプラズマプローブからもとめられたプラズマ周波数との関係を表わしたものであつ

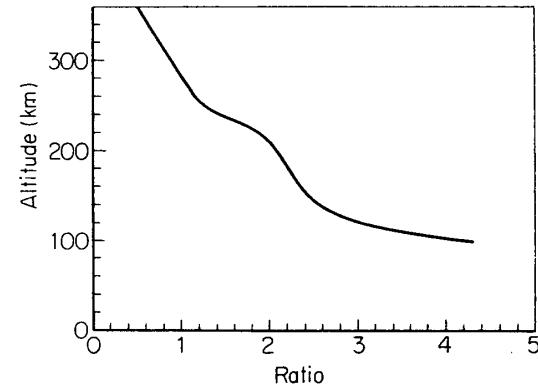
て、一、二の点をのぞいてはよい一致を示しており、レゾナンスプローブの補正法が満足すべきものであり、電離層の測定に十分使用しうるものであることを示している。

### 3.2 正イオン密度

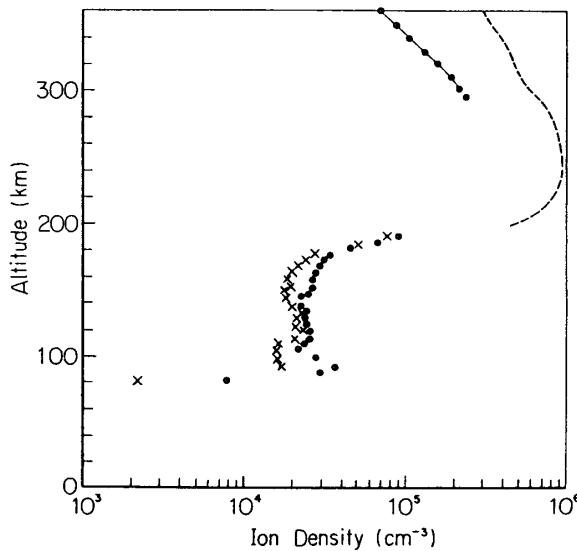
固定電圧の Langmuir プローブによって上昇時高度 78 km～358 km、下降時 358 km～86 km まで正イオン飽和電流が測定され、その結果を第 9 図に示してある。ここで黒点および掛印は測定区間（約 2 秒間）における電流の最大値および最小値である。また同図に示すごとく上昇時、下降時共に最大密度付近において增幅器の利得が大きすぎたためイオン電流がスケールオーバーして測定ができなかった。イオン電流からイオン密度を算定するとき、イオン温度、イオン質量については今までに得られている結果[5][6]を参照した。第 10 図にはロケットの速さ  $v_R$  とイオン最大確率速度  $(2kT_i/M_i)^{1/2}$  を示してあり、第 11 図にはそれらの比  $v_R/(2kT_i/M_i)^{1/2}$  を示してある。さてこれらの用意された図表などを用いてイオン密度を計算した結果は第 12 図に示しある[7]。同図において約 300 km 以上は点線で示さ



第 10 図 ロケットの速さおよびイオンの最大確率速度

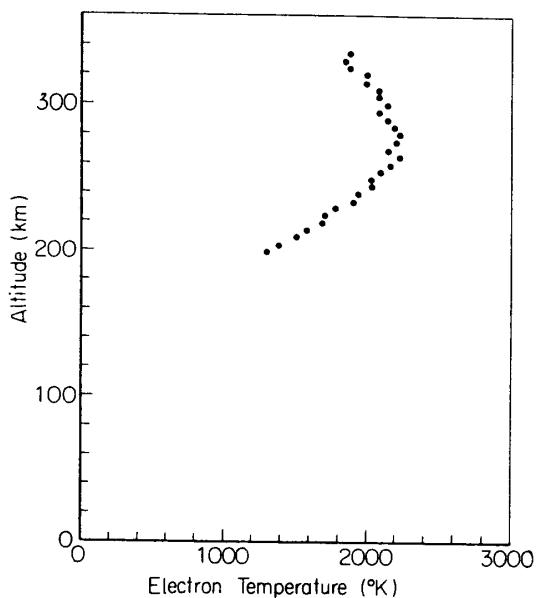


第 11 図 ロケットの速さとイオン最大確率速度の比



第 12 図 K-9M-20 による正イオン密度の測度結果（上昇時）

れているレゾナンス・プローブ法から求めた値にくらべて 1/3 以上も小さい。これは第 11 図によると比が 1 以下に相当する部分である。一方約 200 km 以下の所では他の測定とよく合っている。すなわちイオン熱運動速度とロケットの速さの比が 1.5 以上のときはかなり計算値がよく合うが、比が 1 以下になると計算値が実際の値とかなりずれてくることがわかる。下降時についてはイオン電流の値が上昇時にくらべてかなり小さくなっている、この原因としてロケット本体の帶電による効果も考えられるが、これについてはさらに検討する必要がある。この



第 13 図 K-9M-20 による電子温度の測定結果（上昇時）

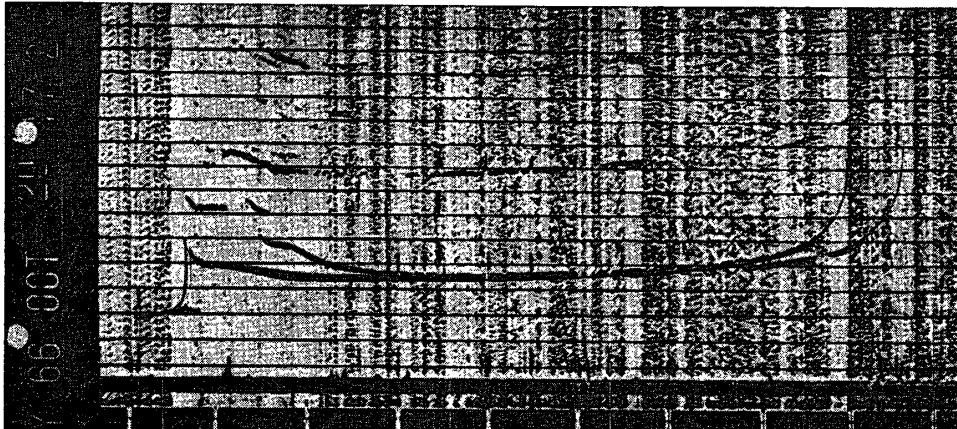
影響は上昇時においても当然現われると考えられるので、上述の計算値が実際とくいちがう一つの原因と考えられる。下降時高度 120 km においてスパラディック E 層が存在しその密度はバックグラウンドに対して 12.4 倍の密度に相当している。

### 3.3 電子温度

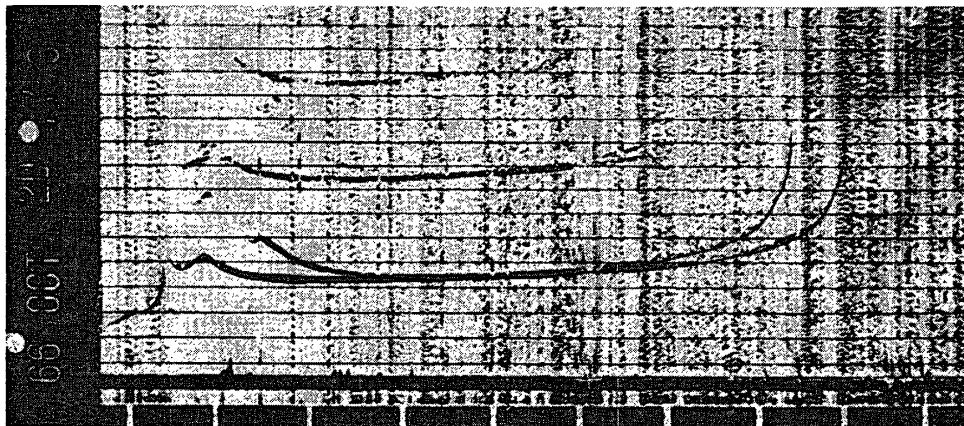
上昇時高度 200 km～335 km まで観測され、その測定結果は第 13 図に示してある。これ以外の範囲はテレメータ記録上で雑音がかなり多く解析ができなかった。

### 3.4 地上観測

ロケットによる直接観測と同時に内之浦のロケット発射場と山川電波観測所の 2 か所において垂直電波打ち上げによる電離層観測を行なった。第 14 図(a), (b) は昭和 41 年 10



第 14 図(a) Ionogram (昭和 41 年 10 月 20 日 17 時 26 分, 山川)

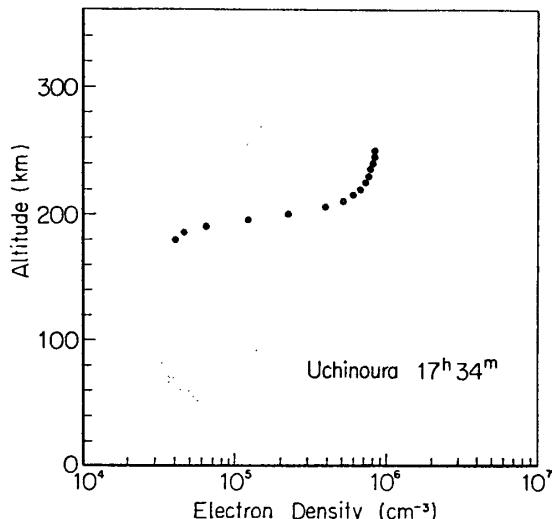


第 14 図(b) Ionogram (昭和 41 年 10 月 20 日 17 時 34 分, 山川)

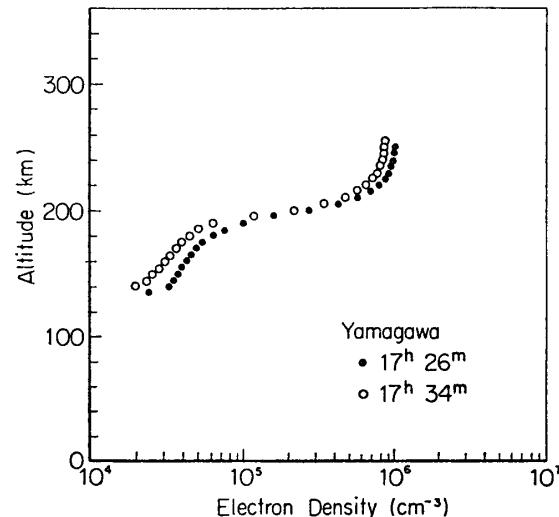
月20日17時26分および17時34分の山川における Ionogram である。第15図は17時34分の内之浦における Ionogram から計算した電子密度の高度分布である。また第16図は同じく17時26分および17時34分の山川における Ionogram (第14図(a), (b)) から計算した電子密度の高度分布である。

#### 4. 考 察

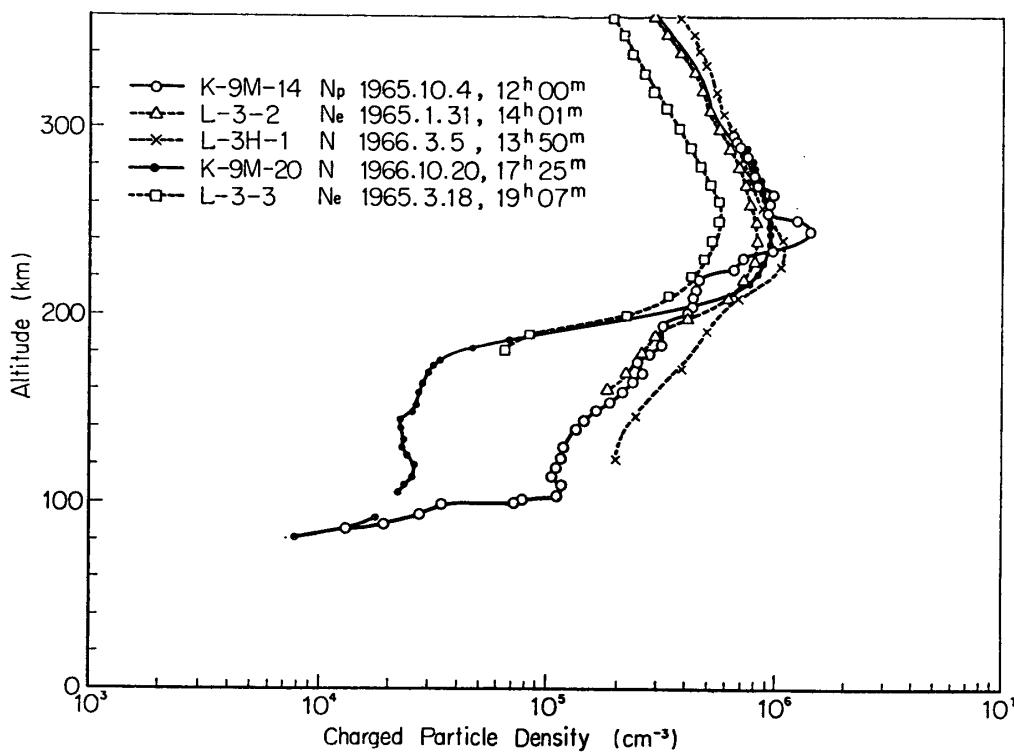
ロケット発射当日の  $\Sigma K_P$  は 8. でその前後も地磁気活動度は静穏であるのでロケット観



第15図 電子密度高度分布（内之浦）



第16図 電子密度高度分布（山川）



第17図 地磁気活動静穏時における荷電粒子密度分布の比較

測によって得られた薄暮時の電離層の測定結果は代表的な静穏日の例である。

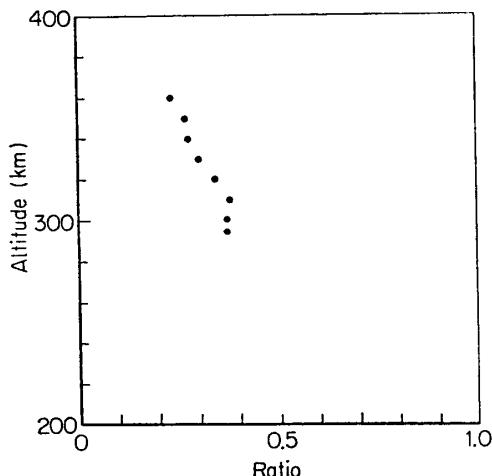
今までに観測された荷電粒子密度の分布を静穏時のみとりだして一括して描いたのが第17図である。K-9M-14, L-3H-1, L-3-2は12時から14時までの測定であるので互いに似ていて典型的な日中のプロファイルを示しているが、17時のK-9M-20の場合はE-F中間領域がかなり減少しており、L-3-3による19時ではF領域も減少しているが、やはりK-9M-20の場合と同じ高度で急激に減少してE-F中間領域の谷がさらに明瞭になっている[5]。この点に関しては次の論文において解説を行なう予定であるが、日中のプロファイルも精しく見ると210km附近でやや急激に減少しているところがあり、夕方および夜間のE-F谷の上限に相当している。すなわち日中において電子密度は100km附近によりほぼ連続にF<sub>2</sub>層までつながっているが、ほぼ210kmを境とした上下およびE層の三つの領域はかなり本質的に異なるものであることを示している。

電子温度に関しては測定下限は約 $7 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ であり、これ以下の密度では測定できない。これはK-9M-15の場合と一致する。このときのプラズマの等価抵抗を計算すると電子温度を1000°Kとして約60MΩである。これは入力抵抗100MΩにかなり近い値である。

次に、約270kmにおいて電子温度の極大2200°Kを示している。これはK-9M-15による夜間観測の場合約255kmにおいて極大2200°Kを有するのと考え合わせて興味がある。

レゾナンス・プローブから計算によって求めた電子密度は他の測定と比較して非常に良い一致を示しているので、これによりレゾナンス・プローブによる測定法の実用性が示された。また夏の固定電圧を印加するLangmuirプローブはロケットの速度が大きいときは正確な値が得られるが、イオンの熱運動速度と同程度あるいはそれより小さくなるとかなりの補正が必要になる。たとえば第18図はこのLangmuirプローブから求めたイオン密度とレゾナンス・プローブから求めた電子密度との比を描いてある。また下降時において電流が少なくなる現象も考えなくてはならない。

最後にレゾナンス・プローブの周波数掃引幅は0~7.5Mc/s、イオン・プローブは0.6μAまで測定できるように設計すべきであった。したがって増幅器の入力抵抗は3.75MΩ、增幅利得2.0倍が適当である。



第18図 Jangmuirプローブにおけるイオン密度の補正比

横河・ヒュレット・パッカード株式会社、東京大学宇宙航空研究所、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のロケット実験の協力に対して深い感謝の意を表する。またIonogramの計算に関して小泉徳次氏に対して感謝の意を表する。

### 謝 辞

1967年4月27日 宇宙科学

## 参考文献

- [1] Hirao, K. and Miyazaki, S.: J. Radio Res. Labs., Vol. 12, No. 64 (1965) p. 357
- [2] 土手敏彦, 一宮虎雄: ロケット搭載用超高層観測装置の研究論文集, 第3号, 昭和41年3月 p. 135
- [3] 土手敏彦, 一宮虎雄: 東大宇宙研報告, 第3巻, 第1号(A) 昭和42年1月 p. 48
- [4] 大家 寛, 大林辰蔵: 超高層超高層および大気圏外域物理学談話会, 昭41年12月.
- [5] 平尾邦雄 ほか: 電波研季報, Vol. 12, No. 60, p. 139, 昭41年5月.
- [6] 平尾邦雄, 宮崎 茂: 東大宇宙研報告, 第3巻, 第1号(A) p. 1, 昭42年1月.
- [7] Dote, T., et al.: J. Phys. Soc. Japan, Vol. 17, No. 1, p. 174 (1962).

## [付記]

本報告第3巻第1号(A), 昭和42年1月「K-9M-15, L-3H-1, L-3H-2 ロケットによる電離観測」の7頁の第12図においてイオン密度の規格化係数は8.6(白丸)および7.2(黒点)である