

インピーダンス・プローブによるロケット実験*

—L-3H-5, L-3H-6—

江尻全機・麻生武彦**・横堀進義**
大家 寛**・大林辰藏

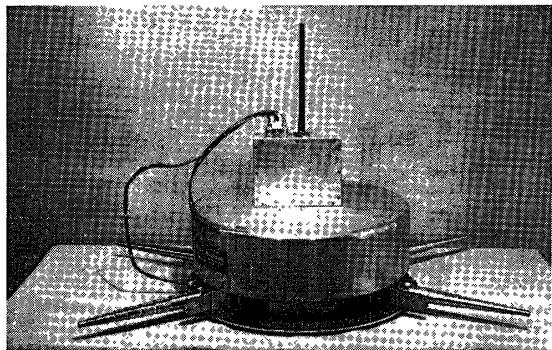
1. はじめに

高周波掃引型インピーダンス・プローブは、プラズマ中のアンテナ・インピーダンスの周波数スペクトルを測定するために、ジャイロプラズマ・プローブとして開発され、1965年より、ロケットに搭載、電離層電子密度観測が行なわれ、現在までに種々の物理現象を見いだしてきて[1], [2], [3]、電子密度測定誤差も±1%という高精度に達した。

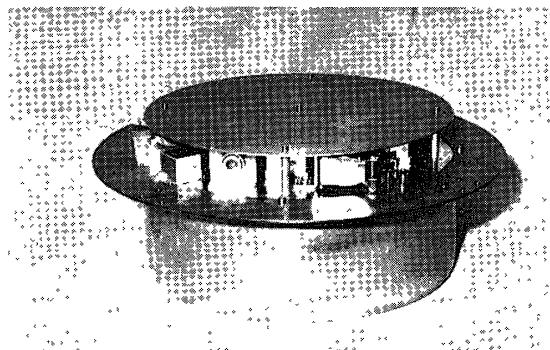
1970年に、2機のラムダ3H型ロケットが内の浦の鹿児島スペースセンタより発射され、高度約250kmより2000kmのF層より磁気圏下部の領域の観測が、昼、夜間に分けて行

表-1 Gyro-plasma Probe Experiments on board Lambda Rockets

Rocket	L-3H-6	L-3H-5
Date	Jan. 21, 1970	Sep. 19, 1970
Time	1100-1120 JST	2030-2046 JST
Altitude	330-1848km	250-1017km
Freq. Range	0.4-30 kHz 0.2-16 MHz	0.2-10 MHz
Sweep Period	2 sec	0.125 & 0.0625 sec
Antenna (Cylindrical)	1600mmL×2	1300mmL×4 600mmL×1



(a) L-3H-5



(b) L-3H-6

第1図 ロケット搭載用インピーダンス・プローブ (NEL) 外観図

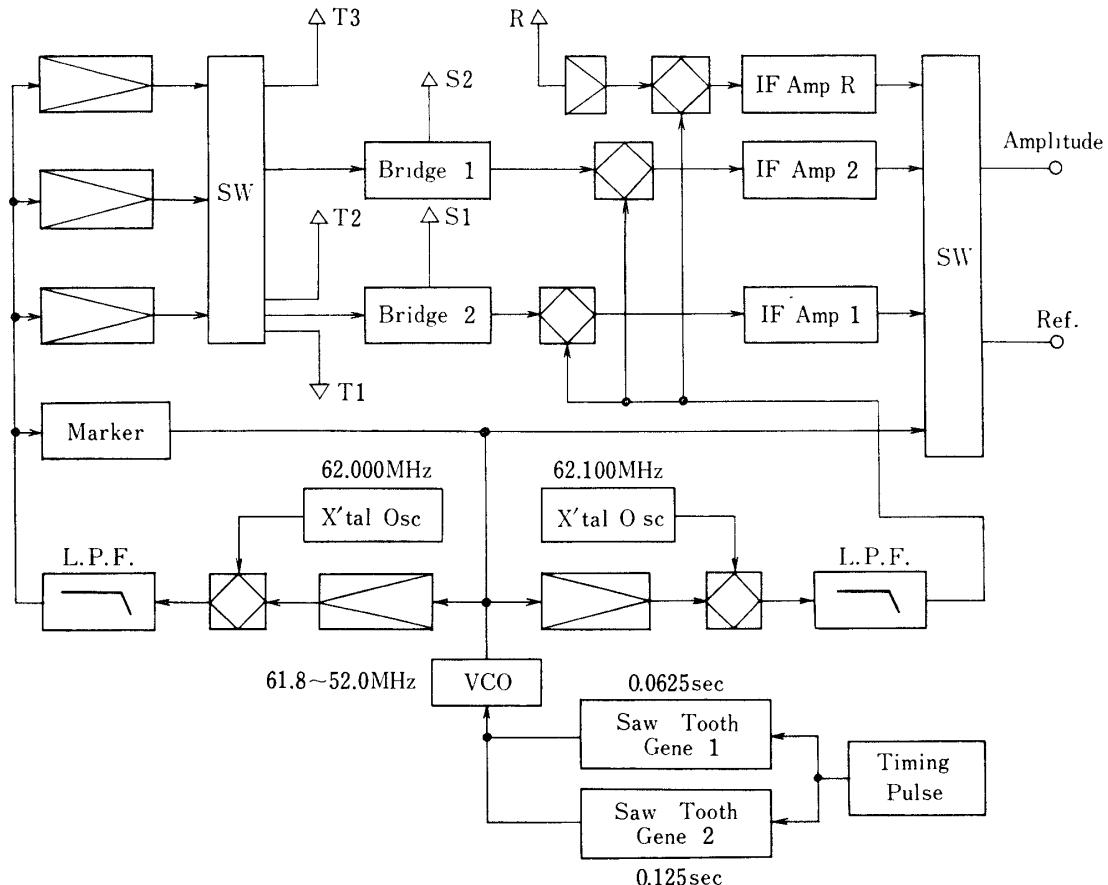
* 宇宙研特別事業費による研究論文

** 京都大学工学部

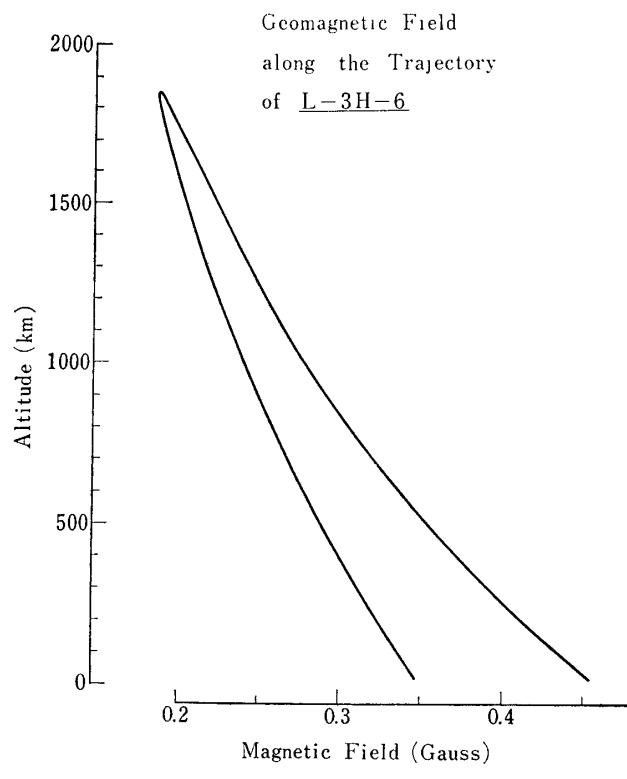
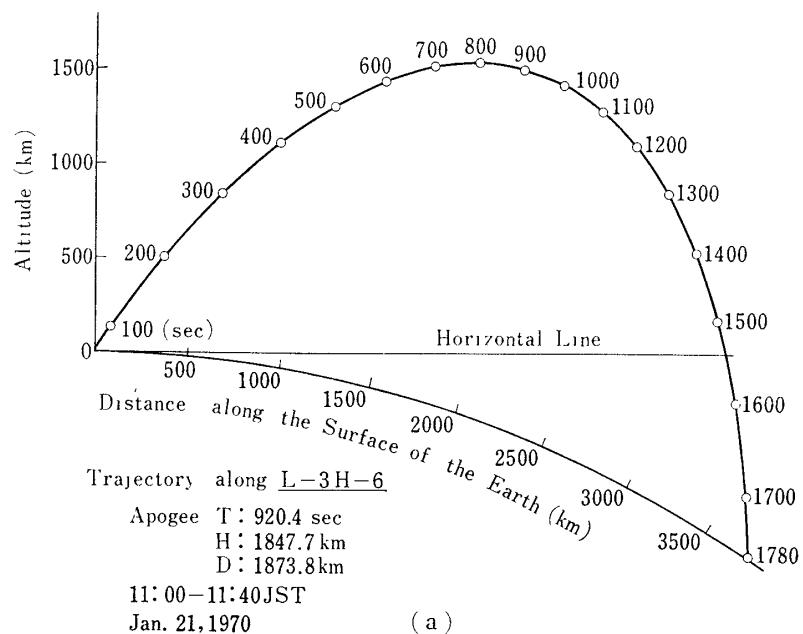
なわれた。今回の実験では、従来の自己インピーダンスの測定のほかに、新たに、2本のアンテナ間の相互インピーダンスの測定も加えられ、プラズマ中の各種共鳴周波数における電磁波伝播特性も調べることが行なわれた。使用したロケットは、L-3H-5 および L-3H-6 号機で、それぞれの諸元を表-1 に示し、搭載機器の外観を図-1 に掲げる。さらに、L-3H-5 号機搭載インピーダンス・プローブのブロック図を図-2 に示す。図中、S1, S2 は掃引周期の異なる自己インピーダンス測定用アンテナ、T1, T2, T3 は送信アンテナ、R は受信アンテナで、T→R の相互インピーダンスの測定を行なう。

測定した自己インピーダンスより、その高域ハイブリッド共鳴周波数 (f_{UHR}) から、地球磁場の理論値[4]より求めたジャイロ共鳴周波数 (f_H) を用いて、プラズマ周波数 ($f_p = (f_{UHR}^2 - f_H^2)^{1/2}$) が計算される。このときのロケット軌道に沿って計算で求める地球磁場の値は、係数の経年変化を考慮に入れると、Fluxgate Magnetometer で実測した値との差は土 100γ 以内で、相対誤差にして約 $\pm 0.5\%$ 以内である[2]。図-3 に L-3H-6 号機の場合の飛しょう軌道と、その軌道に沿って地球磁場の値を計算した結果を示す。このプラズマ周波数

Measuring Circuit for Self & Mutual Impedance



第2図 L-3H-5 搭載インピーダンス・プローブ (Self & Mutual Impedance 測定方式) ブロック図



第3図 L-3H-6 の飛しょう軌道(a)と軌道に沿った地球磁場の理論曲線(b)

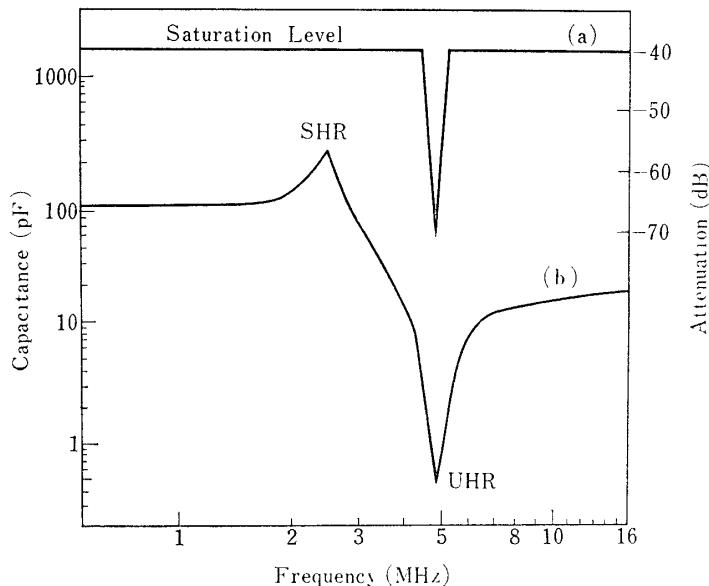
より電子密度 (N_e) が計算され、昼・夜間の高度分布が得られた。上記高域ハイブリッド共鳴のほかに、カッパ-8型-15号機ではじめて検出された[2]サイクロトロン周波数の第2高調波($2f_H$)での共鳴が、自己インピーダンスおよび、相互インピーダンスにも検出され、再確認することができた。さらに、シーズ・インピーダンス値より温度が求められ、相乗りの Retarding Potential Analyzer で測定した値[5]とよい一致を示し、これらの電子密度・温度を用いて、500km 以上の高度における粒子の拡散平衡について調べ[7], [8], O^+ , He^+ , H^+ イオンの組成比の高さに対する変化を求めることができた。

2. 観測結果と考察

2.1 共鳴現象（サイクロトロン高調波の検出）

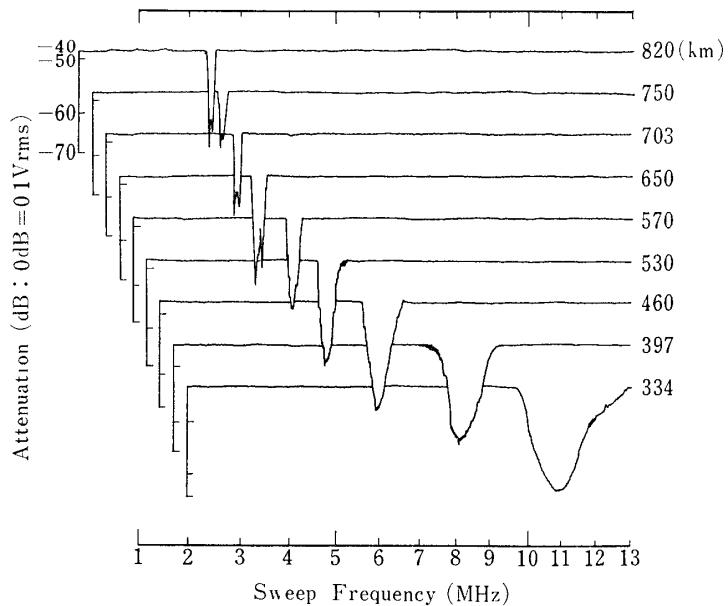
ジャイロプラズマ・プローブは、アンテナ・インピーダンスを、アドミッタンスの形でその絶対値および位相に分けて周波数スペクトルを測定する。アドミッタンスの絶対値は、アンテナを含む容量ブリッジの不平衡成分として検出するため、キャパシタンスの形で出力が出る。一方、相互インピーダンス測定は、送信アンテナより定電圧で高周波掃引信号を出し、同期した高入力受信機で受信したレベルを出力として出している。この受信レベルから、送受信アンテナの自己インピーダンスを用いて、相互インピーダンスを求めなければならないが、ここでは受信レベルそのものを議論する。

図-4 に L-3H-6 号機で得られた出力を示す。(1)は高度 530km の例で、(b)は自己アドミッタンスの絶対値を等価容量で示してある。図中並列共振として UHR は高域ハイブリッド共鳴、直列共振として SHR はシーズ共鳴である。(a)は同じ高度での受信機の受信レベルであるが、(b)と比較して UHR でもって dip (spike) がある。この dip の高度による

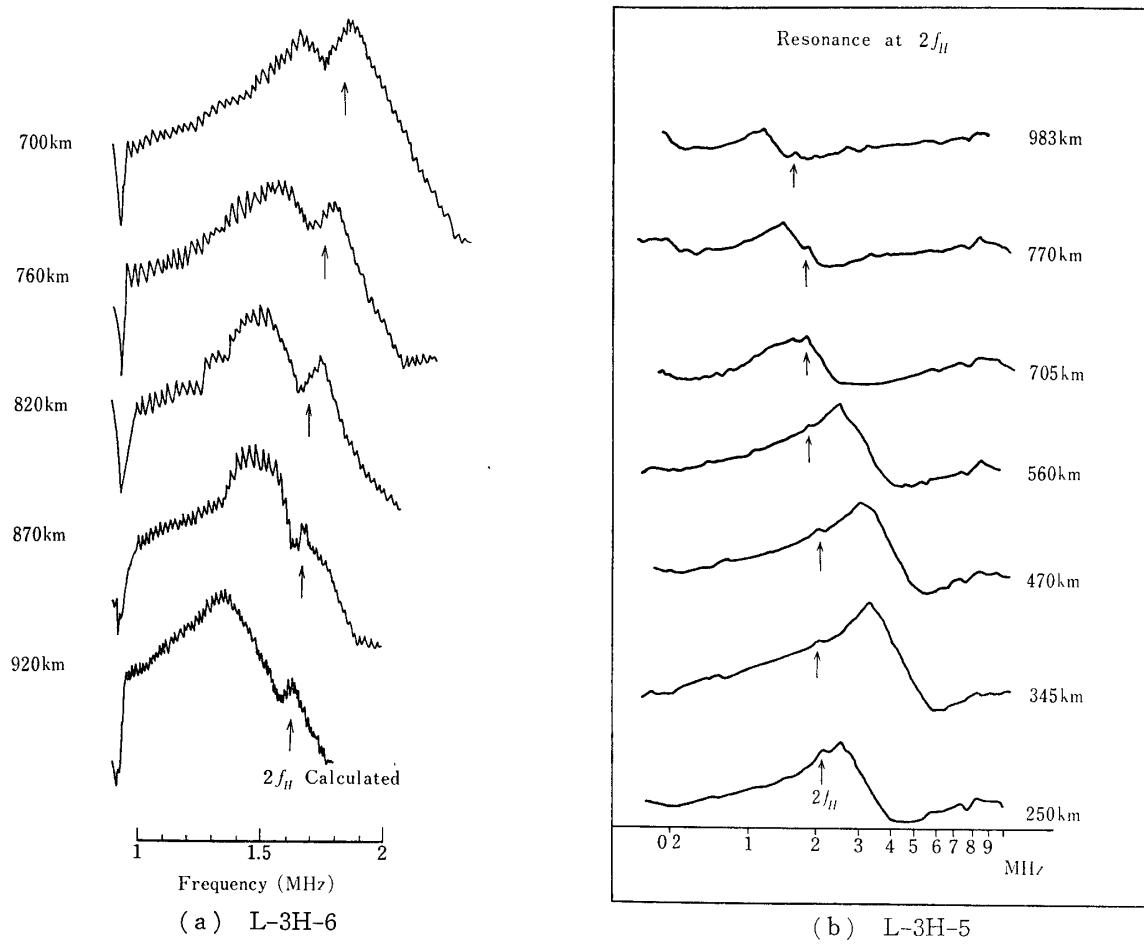


第4図 インピーダンス・プローブの出力波形

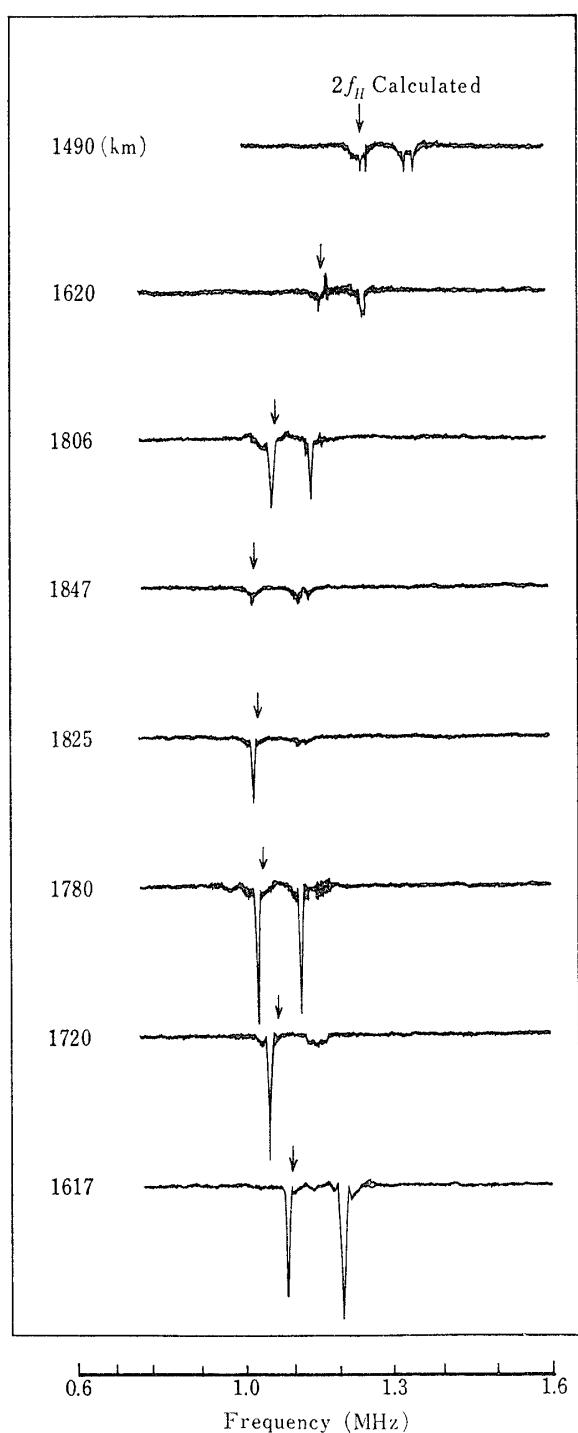
- (1) 高度 530km で得られた Data
- (a) 受信機の受信レベル($0\text{dB}=0.1\text{VRms}$)
- (b) 自己アドミッタンスの等価容量対掃引周波数



第4図 インピーダンス・プローブの出力波形
(2) 受信機の受信レベル、UHR Spike の高度変化



第5図 サイクロトロン共鳴の第2高調波 ($2f_H$) での等価容量の変化



第6図 サイクロトロン共鳴の第2高調波($2f_H$)での受信機受信レベルの変化(L-3H-6)

5.2×10⁵/cm³)にきわめてよく一致している。測定値の分散は、ロケット本体のスピニによる航跡によって電子密度が少ない領域をアンテナが走査している結果である。

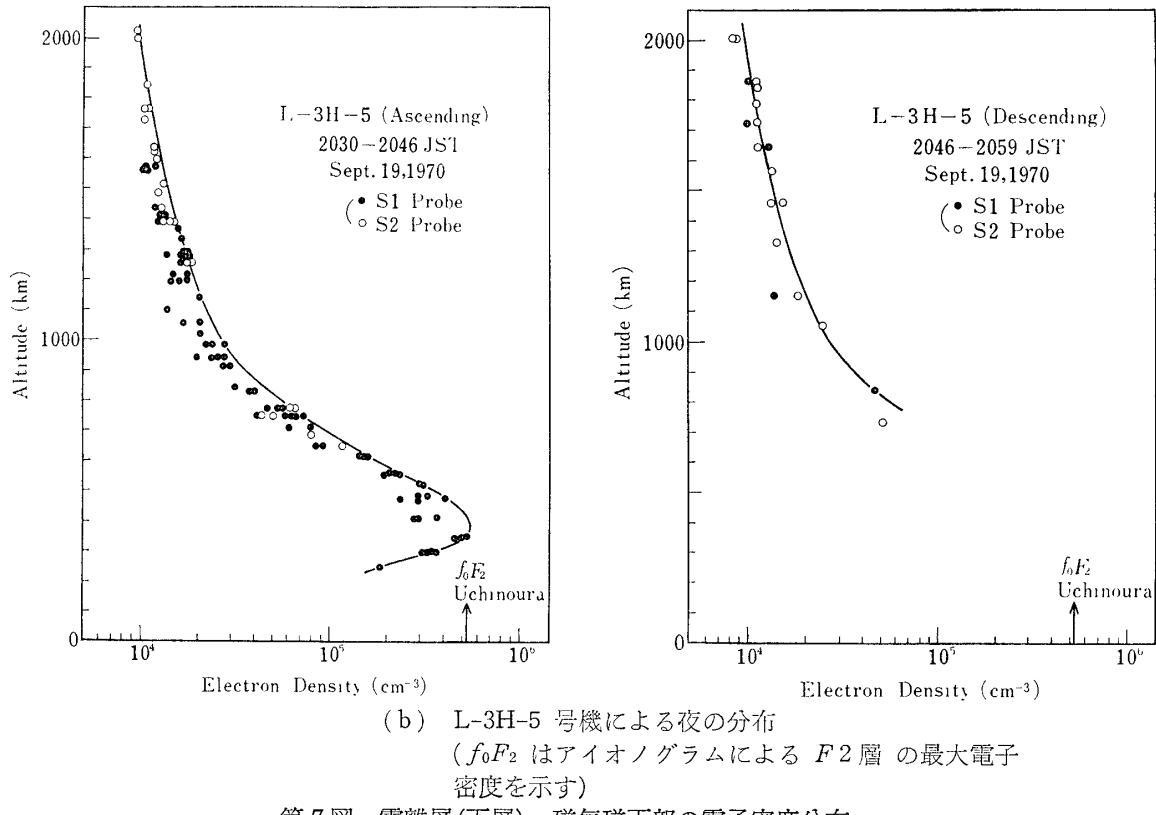
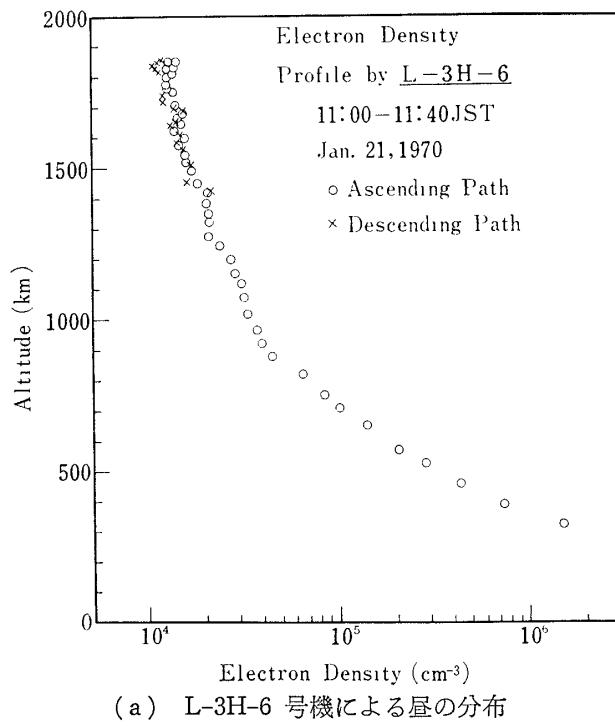
現在までにラムダ型ロケットによる観測は今回の2機のほかに、L-3H-2号機による夏の

変化を示したのが(2)で、電子密度および磁場の強さが高度と共に小さくなり、UHR周波数が低くなるに従って、UHRに追随して移動している。これは、UHRでは送信アンテナに流れる電流が無限小になって、cut offの状態になることで説明できる。SHRについての変化は、送信レベルが大きすぎて判明できなかった。

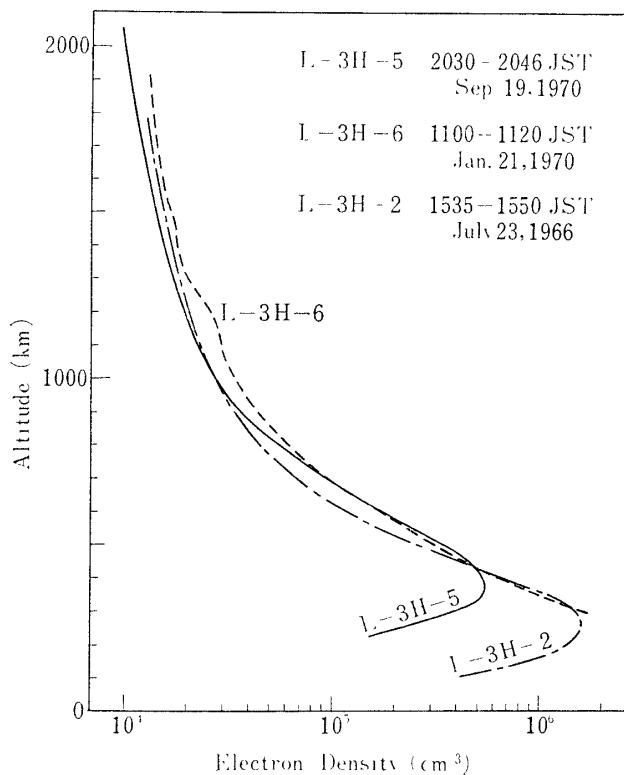
サイクロトロン共鳴の第2高周波は、K-8-15号機で等価容量、位相共に直列共振として検出された[2]。F. Melzner et alのロケット実験でも等価容量の変化として検出されている[9]。今回の実験でも、図-5に示すように、5号機、6号機共に $2f_H$ でピークとして検出された。図中矢印は地球磁場の強さから計算した $2f_H$ である。これらは、 $2f_H$ と f_{UHR} が近づくと明らかになり $2f_H \ll f_{UHR}$ または $f_{UHR} \ll 2f_H$ では検出できなくなる。図-4の(a)で $2f_H$ のpeakがないのはそのためである。受信レベルに及ぼす変化は図-6に示してあるように、近傍でdip(spike)ができている。等価容量の $2f_H$ でのピークは、electrostatic Bernstein modeに関連していると考えられているが、受信レベルの変化は現在わかっていない。

2.2 電子密度分布

L-3H-6、L-3H-5号機で測定された高域ハイブリッド共鳴周波数より求めた電子密度の高度分布を図-7に示す。6号機では測定を始める高度が高く、F2層の最大電子密度は求められなかったが、5号機では、図中 f_0F2 の矢印に示してあるように、内の浦での同時地上観測されたアイオノ・グラムより求めたF2層の電子密度(N_e ~



第7図 電離層(下層)・磁気磁下部の電子密度分布



第8図 L-3H-2, 5, 6号機による電子密度分布の観測結果の比較

昼 (July 23, 1966) の観測がある。季節および太陽活動度等の違いがあるが、密度分布の比較をしてみると図-8 のようになり、F2 層以下では、昼・夜間の違いが明らかで、夜間、電子密度が減少している。500km 付近より高い所では、電子密度の昼・夜の差はあまりない。これは、高度 500km 以上では電子密度分布は、電離層が層状であるとすれば、イオンの拡散平衡によるとして説明することができる。また、この分布よりスケール・ハイトを求ることによって、イオンの組成比について論ずることができる。L-3H-5 について解析した結果を 2.4 で示す。

2.3 ジャイロプラズマ・プローブによる電子温度の計算[6]

シース共鳴周波数より十分低い周波数領域におけるプラズマ中のアンテナの容量は、アンテナの回りに形成されるイオン・シースの容量 C_s にはほぼ等しいと考えられる。観測データから読み取った容量値の高さ分布を 図-9 に示す。この容量値よりシースの厚み R_s が計算され、さらにアンテナのフローティング・ポテンシャル φ_0 が与えられる。

$$C_s = 2\pi\varepsilon_0 L / \ln(R_s/R) \quad (1)$$

$$\varphi_0 = \frac{-Ne}{4\varepsilon_0} \left[R_s^2 \left\{ \ln \left(\frac{R_s}{R} \right)^2 - 1 \right\} + R^2 \right] \quad (2)$$

ここに、

L : アンテナの長さ ε_0 : 真空中の誘電率

R : アンテナの半径 e : 電子電荷

N_e : 電子密度

この φ_0 による電子電流 I_e が、ロケットが運動していることに起因するイオン電流 I_i と打ち消し合っているから

$$I_e \equiv 2\pi R N_e e L (k T_e / 2\pi m_e)^{1/2} \exp(e\varphi_0/kT_e) = I_i \quad (3)$$

$$I_i = 2RLN_i e W \sqrt{1 + \frac{2e|\varphi_0|}{m_i W^2}} \quad W > v_0$$

$$= 2R_s L N_i e W \quad W < v_0$$

$$v_0^2 = \left\{ R^2(R_s^2 - R^2) \right\} \frac{2e|\varphi_0|}{m_i}$$

ここに、

W : ロケット速度

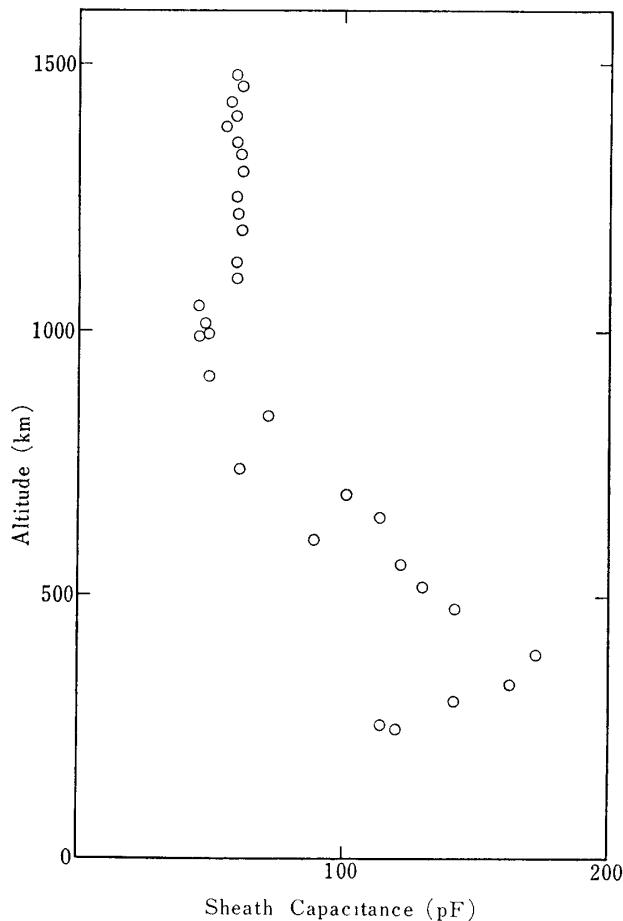
m_e : 電子質量

T_e : 電子温度

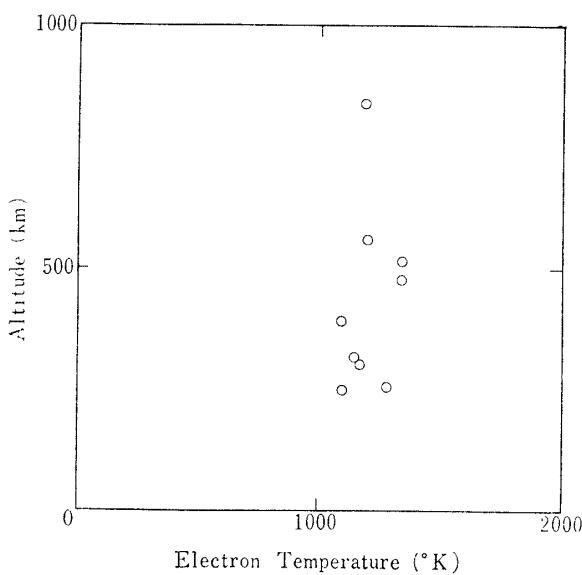
m_i : イオン質量

k : ボルツマン定数

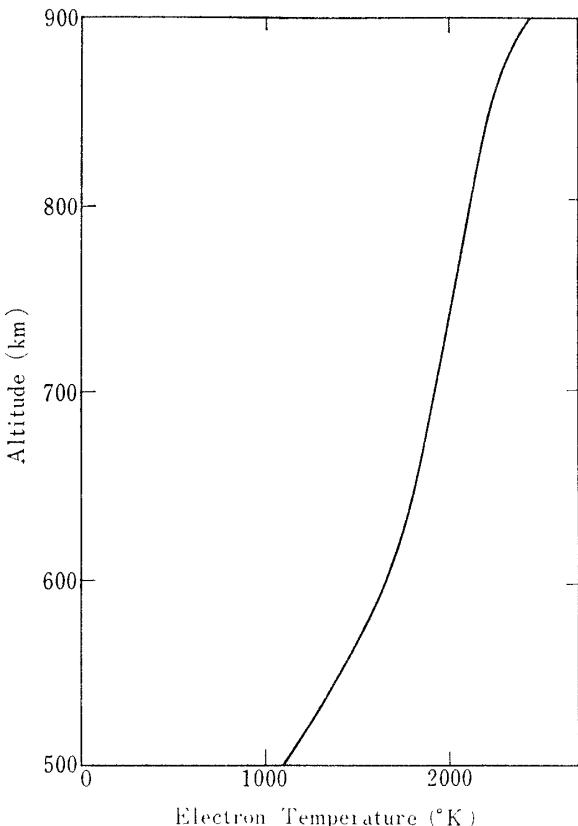
これらの式を解いて求めた電子温度 T_e を図-10 に示す。電子温度はほぼ $1100^{\circ}\text{K} \sim 1400^{\circ}\text{K}$ の間にあり。Retarding Potential Analyzer による測定結果とおよそ一致した値を示してい



第9図 アンテナのシース容量の高度変化



第10図 シース容量より求めた電子温度分布



第11図 Retarding Potential Analyzer による電子温度分布

る。しかし、この方法にはシースの形がプローブと相似形であるという仮定なども含んでおり、さらに厳密なシース構造の解明をしなければならない。

2.4 イオン組成比

2.2 および 2.3において、電子密度・温度の分布を求めた。ここで高度 500km 以上の領域におけるイオンの組成比が、拡散平衡している場合いかようになるかを解析する。電子密度は図-7 の L-3H-5 号機による観測データを用い、電子温度は同時に搭載した Retarding Potential Analyzer によって測定した値[5]を平均化して高度 900 km まで伸ばした分布図、図-11 を用いる。

高度 500km 以上で各イオンが拡散平衡にあるとすると、 Z を地上 500km を基準とした高度としたとき、各イオン密度は次式によって与えられる。

$$n_i(z) = n_{i0} \left(\frac{T_{e0}}{T_e(z)} \right)^2 \exp \left(- \int_0^Z \frac{dz}{H_i(z)} \right) \left(\frac{n_{e0}}{n_e(z)} \right) \quad (4)$$

ここに、

$$H_i(z) = k T_i(z) / m_i g \quad . \text{Scale Height}$$

g : 重力加速度

T_i : i -イオン温度

T_e : 電子温度

n_i : i -イオン密度

n_e : 電子密度

suffix 0 は 500km における値を示す。

今、イオンの組成を $O^+(i=1)$, $He^+(i=2)$, $H^+(i=3)$ として、電子温度と各イオン温度は等しいとする。この仮定は、F2層より上ではほぼ満足している。Bauer[8]にしたがって 500km で電子温度 T_{e0} のときの各イオン組成の比を次式で与える。

$$\frac{\eta_{20}}{\eta_{10}} = 0.2 \times 10^{-T_{e0}/1000}$$

$$\frac{\eta_{30}}{\eta_{10}} = 0.16 \times 10^{-T_{e0}/500} \quad (5)$$

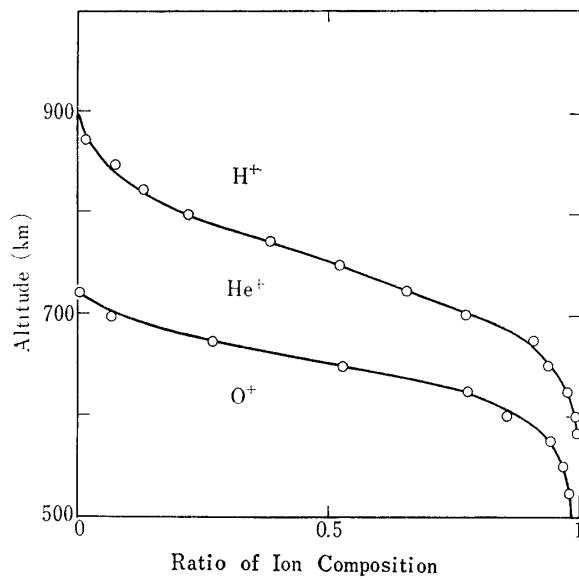
$$\eta_i = \frac{n_i}{n_1 + n_2 + n_3} = \frac{n_i}{n_e}$$

$$\eta_1 + \eta_2 + \eta_3 = 1$$

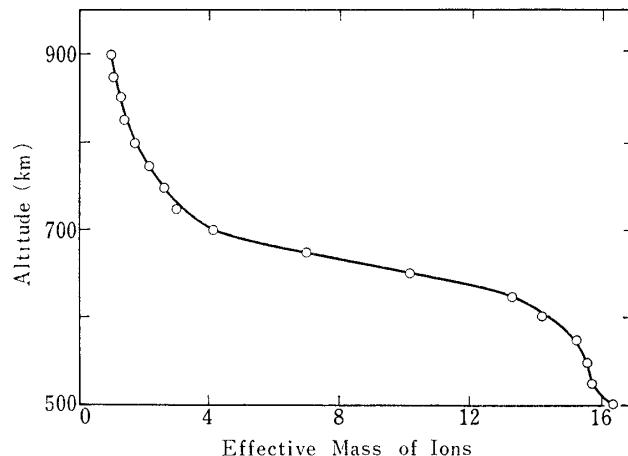
$T_{e0} = 1100^{\circ}\text{K}$ であるから $\eta_{10} = 0.98338$, $\eta_{20} = 0.01564$, $\eta_{30} = 0.00098$ となる。

各イオンの組成比の高度分布は

$$\begin{aligned} \eta_i(z) &= \frac{n_i(z)}{\sum_i n_i(z)} \\ &= \frac{\gamma_i \eta_{i0}}{\sum_i \gamma_i \eta_{i0}} : \gamma_i = \frac{n_i(z)}{n_{i0}} \end{aligned} \quad (6)$$



第12図 イオン組成比の高度分布



第13図 平均分子量の高度分布

で与えられたる。

観測値を用いて(4)式を数値積分し、(6)式によって高度分布を計算した結果を図-12に示す。この結果より、650km～700kmにかけて酸素イオンよりヘリウムイオンに移行し、700kmではヘリウムイオンの層になっていることがわかる。800km～900kmよりうえではほとんど水素イオンである。これを平均分子量で表わすと、図-13のようになる。

3. 結 言

ロケットの性能が向上し、地上2000kmまでの科学観測が可能になり、F2層より磁気圏下部に至る領域におけるプラズマ諸量が求められるようになった。従来電子密度測定用プローブとして、精度のうえからも、また、信頼性のうえからも確立した、ジャイロプラズマ・プローブに、相互インピーダンスの測定を加えて二度にわたり、ラムダロケットによって観測がなされ、電子密度・温度に加えて、それらよりイオンの組成比を求める試みた。また、プローブ特性として、高度によって変わる密度、地球磁場の強さなどによって各種共鳴現象を見分けることができた。ここでは言及しなかったが、電子衝突周波数の低いCollisionless plasmaでのアンテナからの電子音波放射等の機構もかなり興味のあるもので、プラズマ諸量の測定とは別にプラズマ中アンテナの実験とし今後取組みたい。

謝 辞

本研究に対し、有益な議論と多大の助言をいただいた京都大学教授、前田憲一先生、加藤進先生、ならびに東京大学教授、平尾邦雄先生に深甚の謝意を表します。本論文に引用させていただいた Retarding Potential Analyzerによる観測データは、郵政省電波研究所の宮崎茂氏の提供によるもので、また、観測データの整理、計算に渡辺勇三技官の協力を得、また、搭載機器は明星電気株式会社に製作を担当していただき、特に八巻敬行、阿部誠両氏の協力を得たことを記し、四氏に対して謝意を表します。このロケット実験は、東京大学宇宙航空研究所観測ロケット実験班によってなされたものです。末筆ながら感謝を致します。

1971年1月21日 新設部(科学)

参 考 文 献

- [1] Oya, H. and T. Obayashi: Rocket Measurement of the Ionospheric Plasma by Gyroplasma Probe, Rep. Ionos. Space Res., Japan, **21**, 1 (1967)
- [2] Ejiri, M. and T. Obayashi: Measurement of Ionosphere by the Gyroplasma Probe, Rep. Ionos. Space Res. Japan, **23**, No. 1, 1-12 (1970)
- [3] 江尻全機、大林辰蔵、インピーダンス・プローブによる磁気圏・電離層観測、宇宙航空研究所報告(東京大学) **6**, No. 1176-189 (1970)
- [4] IAGA Working Group: Analysis of the Geomagnetic Field, J. Geomag. Geoele., **21**, 569-571 (1969)
- [5] Miyazaki, S.: Private Communication

- [6] Oya, H. and T. Aso: Ionospheric Electron Temperature Measured by a Gyro-plasma Probe, Space Research, IX, 287 (1969)
- [7] Angerami, J. J. and J. O. Thomas, The Distribution of Ions and Electrons in the Earth's Exosphere, Tech. Rep. No. 4, SEL-63-110, Stanford Univ., Stanford Calif. (1963)
- [8] Bauer, S. T., Helium Ion Belt in the Upper Atmosphere, Nature, 197, 36 (1963)
- [9] Melzner, F. and H. H. Robben: Electron Density Measurements in the Ionosphere with High Altitude Rockets, "Plasma Waves in Space and Laboratory", vol. 2, 77-87, Edinburgh Univ. Press (1970)