

S-210-6 号機による電離層電子密度の測定

渡 辺 勇 三・江 尻 全 機・大 林 辰 蔵

Measurement of the Ionospheric Electron Density by Using S-210-6 Rocket

By

Yuzo WATANABE, Masaki EJIRI and Tastuzo OBAYASHI

Abstract : Capacitance probe, a kind of RF plasma probes, was installed to measure the electron density in the lower ionosphere using S-210-5 sounding rocket on September 28, 1970 at Kagoshima Space Center. Unfortunately, the observation was not carried out because of the failure of the separation of the rocket nose cone. The study of the capacitance probe have been performed in the laboratory plasma and good agreements with the impedance probe and the Langmuir probe methods to measure the electron density in a plasma have been obtained. S-210-6 sounding rocket was launched on January 21, 1972, and the capacitance probe, the impedance probe and the fixed bias Langmuir probe were installed. The electron density in the lower ionosphere (72 km~109 km) was successfully measured with these three plasma probe methods, and the ionogram simultaneously obtained at Yamagawa Radio Observatory shows the same electron density value at E layer. Some problems about the probe methods onboard the sounding rocket are discussed, especially about the wake effect on the frequency spectrum of the antenna impedance and the $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ effect on the capacitance probe and the Langmuir probe. The relation between the cyclotron harmonics and the sheath resonance frequency, and its electron density dependency are shown both in the rocket experiment and in the laboratory plasma experiment. The improved type of the capacitance probe is developed and the experiment will be carried out in January, 1973, using S-210-8 sounding rocket.

1. 緒 言

S-210-6 号機ロケットは、1972 年 1 月 21 日に、11 : 24~11 : 29 JST の間、下部電離層観測の目的で打ち上げられた。これに搭載したインピーダンスプローブ、キャパシタンスプローブ、ラングミュアプローブは正常に動作して良質のデータを得られた。

インピーダンスプローブは、プラズマ中アンテナの高周波自己アドミタンスの周波数スペクトルを、容量ブリッジの不平衡成分として測定する装置で、検出された高域ハイブリッド共鳴周波数と、地球磁場によるジャイロ共鳴周波数より、プラズマ中電子密度を非常に精度

良く求めることができる [1][2][3][4].

キャパシタンスプローブは、ハートレイ型発振回路の LC 共振タンク回路の容量として、二枚の平行円板金属メッシュプローブを用いたもので、メッシュ間プラズマの状態によって発振周波数が変化するので、この変動分からプラズマ中諸量を連続的に測定する装置である [5][6][7][8].

ラングミュアプローブは、プラズマ中の金属製プローブに電圧信号を与えて、そのときのプローブ電流から電子密度、電子温度を測定することができるが、今回は約 2.7 V の DC 固定電圧バイアスを加えて、飽和電子電流を得て、プラズマ中電子密度を求めることを行なった.

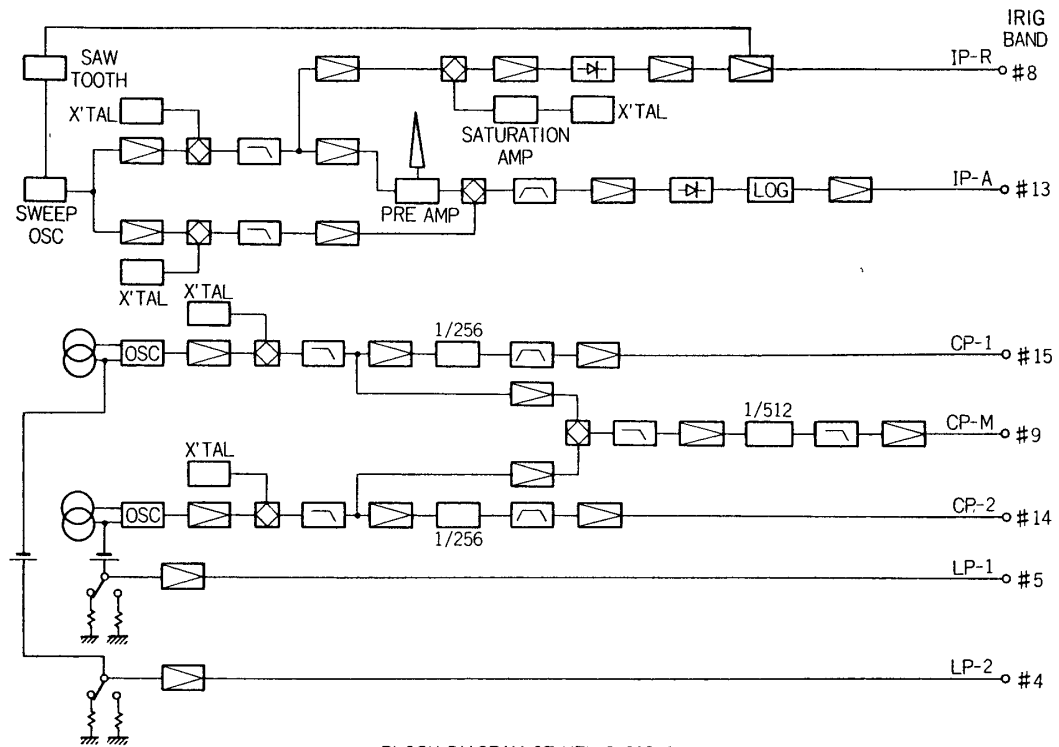
ここでは、S-210-6 号機ロケットによる上記各測定器の電離層電子密度の測定結果を検討するとともに、インピーダンスプローブにおいては、WAKE 中の応答特性、また、プローブの一部が WAKE 中に浸って、非一様電子密度中で測定したときのプローブ特性について触れ、さらに、 $2f_H$ と $3f_H$ の電子密度依存性を検討する. また、キャパシタンスプローブ、ラングミュアプローブにおいては、プローブが磁場を切って生じる誘導起電圧の効果が SPIN 周期で両プローブに及ぼす現象について述べる. また、次回の S-210-8 号機搭載のキャパシタンスプローブについて、その改良点などを記述する.

2. 下部電離層電子密度の高度分布の観測結果

S-210-6 号機ロケットは 1972 年 1 月 21 日、11 時 24 分、KSC より上下角 73.0 度、方位角 133.0 度で打ち上げられ、最高高度 109.3 km に達し、5 分 16 秒後に内之浦南東海上 133.3 km に着水した. 図-1 に搭載観測器の BLOCK-DIAGRAM を示す. インピーダンスプローブは、直径 10 mm、長さ 1 m の円筒プローブをロケットの先端から下方 50 cm の位置にセットして、これを容量ブリッジの一辺に含ませて、プラズマ中プローブのアドミタンスの周波数スペクトルを測定するもので検出可能等価容量値は、0.5 pF から 1,000 pF である. また、プローブ点印加信号は 100 mV_{RMS} で 0.2 MHz から 15 MHz まで周波数掃引している. 図-2 に、その波形と周波数マーカを示す. 周波数マーカは、1.0 MHz 水晶制御矩形波発振器の出力を掃引信号に MIX して、1.0 MHz の奇数高調波に周波数マーカを作る方式のものである. キャパシタンスプローブは直径 100 mm の円形金メッキメッシュプローブを二枚平行に配置したもので、平行平板間隔が 60 mm の CP1 と 30 mm の CP2 の二系統搭載し、これで LC 共振タンク回路を構成して、約 15 MHz で発振させている. これを水晶制御固定周波数発振器の出力と MIX して差を作り、さらにデジタル的に分周してテレメーターで FM 伝送している. この二組のメッシュプローブは、ロケットの先端に 50 cm のアームで水平に、かつ対称に展開した. キャパシタンスプローブの発振周波数は次式で示される.

$$f_i = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_i(C_{pi} + C_{sti})}} \quad (1)$$

$$f_{i0} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_i(C_{poi} + C_{sti})}} \quad (2)$$



BLOCK DIAGRAM OF NEL S-210-6

図-1

SWEEP TIME : 1.0sec

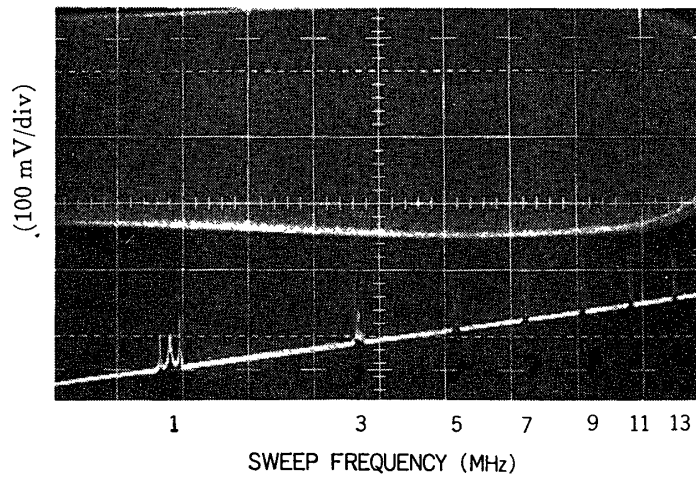


図-2

ここで,

$$\frac{1}{C_{p1}} = \frac{2}{\epsilon_0 \frac{S}{A\lambda_0}} + \frac{1}{\epsilon_0 \left(1 - \frac{f_p^2}{f_i^2}\right) \left(\frac{S}{d_i - 2A\lambda_0}\right)} \quad (3)$$

$$\lambda_0 = 6.90 \sqrt{T_e / N_e} \quad (4)$$

したがって,

$$\Delta f = f_i - f_{i0} \doteq \frac{f_p^2 \cdot C_{poi}}{2f_{i0}(C_{sti} + C_{poi})}, \quad (f_p \ll f_{i0}) \quad (5)$$

$$\log \Delta f = \log N_e + \text{const.} \quad (6)$$

ただし, N_e : 電子密度

T_e : 電子温度

λ_0 : デバイ長

C_{pi} : プラズマ部分とシース部分を含むプローブ容量

S : プローブ面積

d_i : プローブ間隔

A : 定数

L_i : 発振用インダクタンス

C_{sti} : 浮遊容量

C_{poi} : 真空中プローブ容量

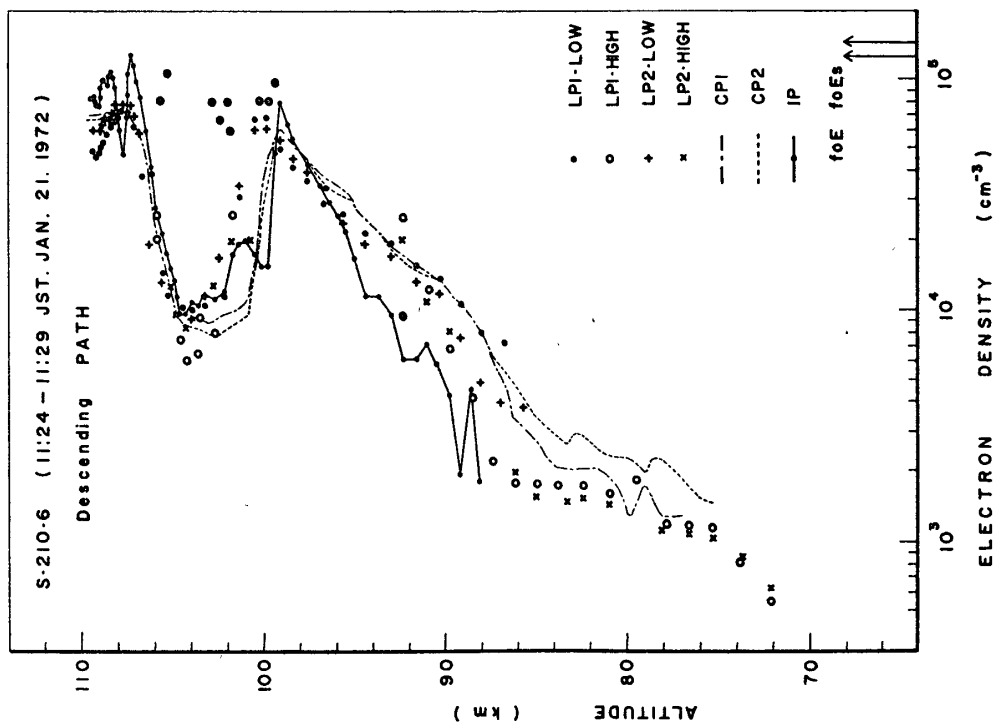
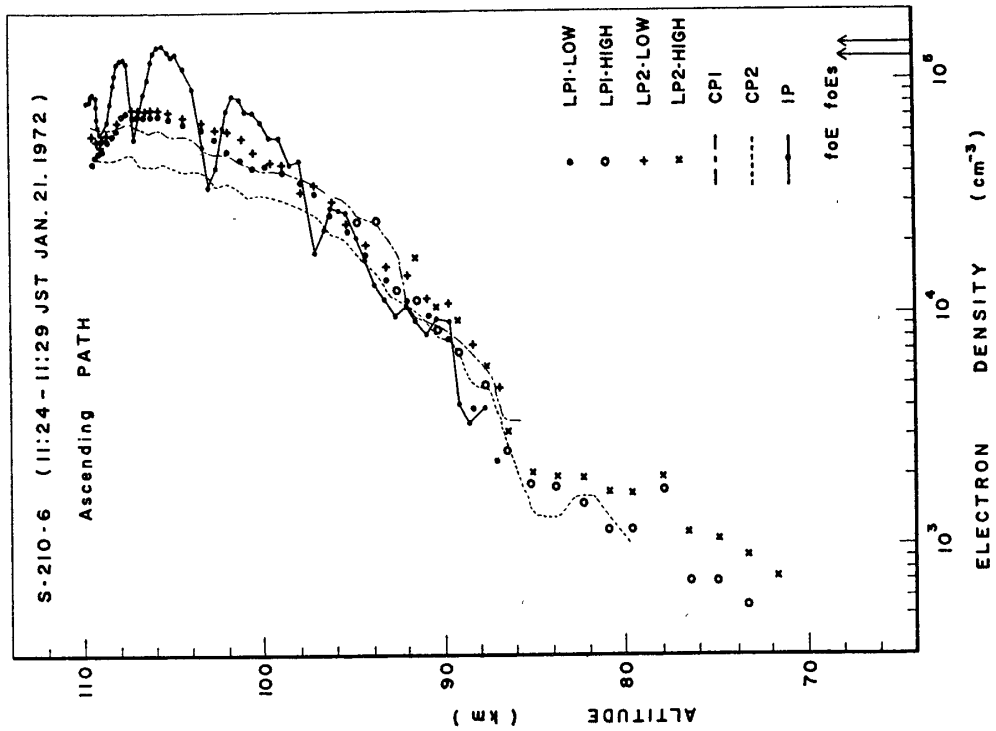
f_i : 発振周波数

f_p : プラズマ周波数

ϵ_0 : 8.854×10^{-12} (F/m)

すなわち, プラズマ周波数より発振周波数が高い場合, プラズマ中での周波数偏移は, 電子密度に比例して変化する. 最後にラングミュアプローブは, キャパシタンスプローブのメッシュを併用しており, プローブ電流を抵抗端電圧として検出している. 抵抗値は $1.0 \text{ k}\Omega$ と $10.0 \text{ k}\Omega$ で 1.0 sec ごとに切り替えて測定を行ない, それぞれを LOW・GAIN, HIGH・GAIN と呼ぶことにした. おおのこの電流検出範囲は, $20 \mu\text{A} \sim 2 \mu\text{A}$ と $2 \mu\text{A} \sim 0.2 \mu\text{A}$ である.

図-3(a) と (b) に, 各測定装置による電子密度の高度分布観測結果を示す. また, 図-4 に同時刻の山川観測所でのアイオノグラムを示すが, $f_oE = 3.20 \text{ MHz}$, $f_oE_s = 3.40 \text{ MHz}$ が得られた. 図-3(a), (b) 中で, これらを電子密度に換算して矢印で示したが, 良好に一致している. 各測定装置の測定領域は, インピーダンスプローブで, 88 km 以上, キャパシタンスプローブで 75 km 以上, ラングミュアプローブで 72 km 以上であった. CP1 と CP2, さらに, LP1 と LP2 も良く合っており, ラングミュアプローブにおける LOW・GAIN と HIGH・GAIN も良く連絡している. 電子密度の測定値は約 $5 \times 10^2 \text{ cm}^{-3}$ (72 km) より E 層で約 $1 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ であった. WAKE の効果は, インピーダンスプローブに著しく出ており, ロケットのスピニング周期とデータサンプリングタイムのビートで大きな電子密度の谷を生じた. さらに, インピーダンスプローブにおいて, 高度の低い所で測定ができていないのは, 電子と中性粒子間の衝突周波数が大きくなって共鳴の Q 値が劣化して, 高域ハイブリッド共鳴周波数が検出不可能になるからである. また, ラングミュアプローブ, キャパシタンスプローブにおいて, 高度の高いところで電子密度を小さく測定しているのは, プローブポテンシャルがプラズマポテンシャルよりも低くなったからで, 前者のときには, 飽和電子電流を得られなかったからで, 後者については, イオンシースが大きくなりすぎたからで


-3

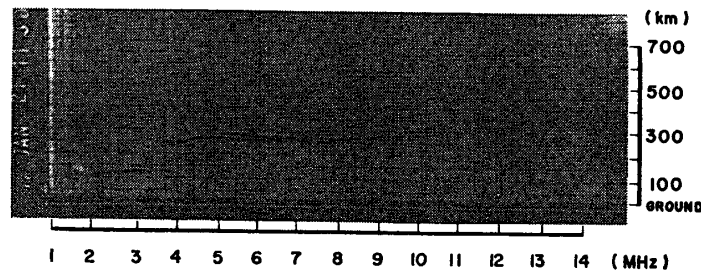


図-4

ある。これについては、6 で述べる。また、降り 104 km を中心に非常に大きな電子密度の凹みを生じたが、これは、各プローブがともに、WAKE に浸ったために生じた現象で、ロケットの飛しょう姿勢が異常であったことを示している。このとき、インピーダンスプローブでは、大きい黒丸で WAKE の外側の電子密度を測定できているが、それは、プローブが WAKE のほかにも一部触れていたときには、プローブアドミタンスの応答スペクトルが特異なものになって、外部の電子密度にも感应したため、これについては次節で述べる。

3. 非一様電子密度中インピーダンスプローブ

インピーダンスプローブは、一様磁場、一様電子密度のプラズマ中では、正確にジャイロレゾナンス周波数で直列共振を、また、高域ハイブリッド共鳴周波数で並列共振を検出できる。ここでは、プローブの長さ方向に電子密度のこう配があり、また、半径方向にシースがある場合のプローブアドミタンスの周波数特性について考察する。図-5 は、WAKE とプローブの位置関係を示すが、円はロケットを輪切りにしたもので、矢印はその進行方向で、ここでは、プローブの位置が (B) であるときについて考察する。プローブ軸方向に (7) 式に示す電子密度分布を仮定し、プローブのアドミタンス値は、近接電界の項のみを考えると (8) 式のようになる。

$$N_e(Z) = \frac{N_{e1} - N_{e2}}{Z_1 - Z_2} \cdot Z + \frac{N_{e2}Z_1 - N_{e1}Z_2}{Z_1 - Z_2} \quad (7)$$

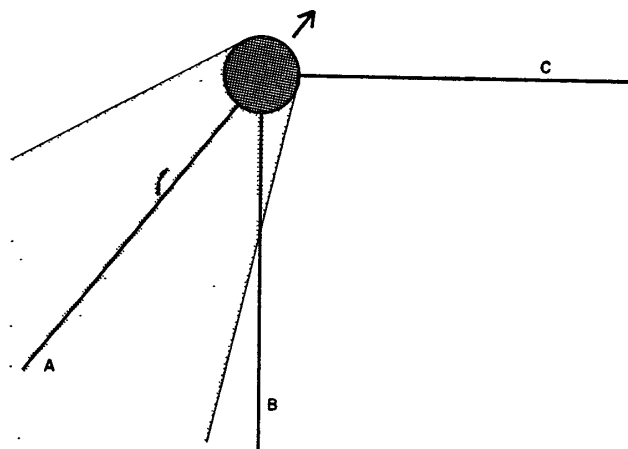


図-5

$$Y = \int_{Z_1}^{Z_2} \frac{2\pi\epsilon_0 \left(1 - \frac{f_p^2}{f^2 - f_H^2}\right)}{\log \frac{60a}{A\lambda(Z)+a} + \left(1 - \frac{f_p^2}{f^2 - f_H^2}\right) \log \frac{A\lambda(Z)+a}{a}} dZ \quad (8)$$

ただし, f_H : ジャイロ周波数

$\lambda(Z)$: デバイ長

a : プローブ半径

図-6 は, 上記 (7) 式を用いて種々の電子密度分布の場合のプローブアドミタンスの計算

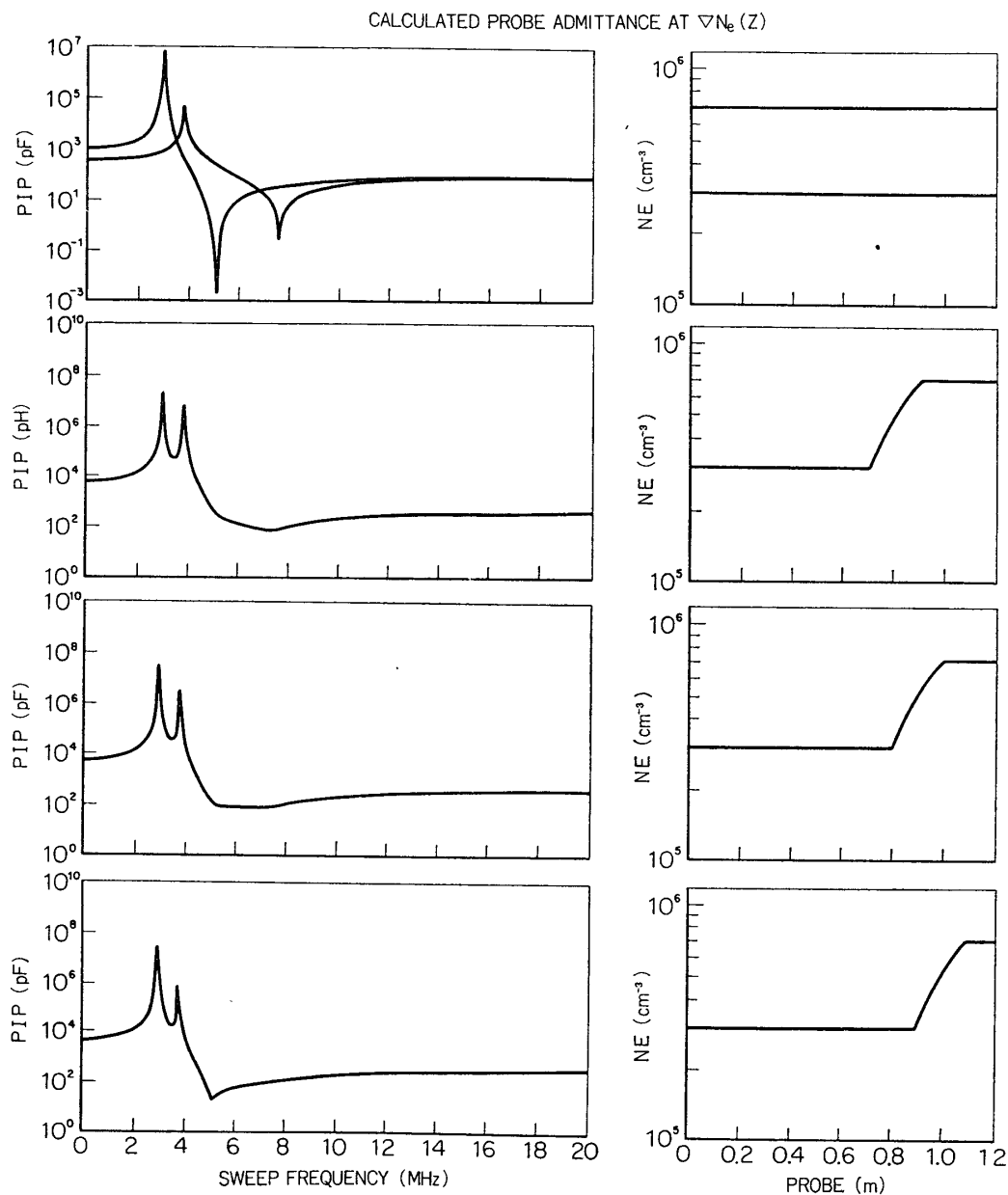
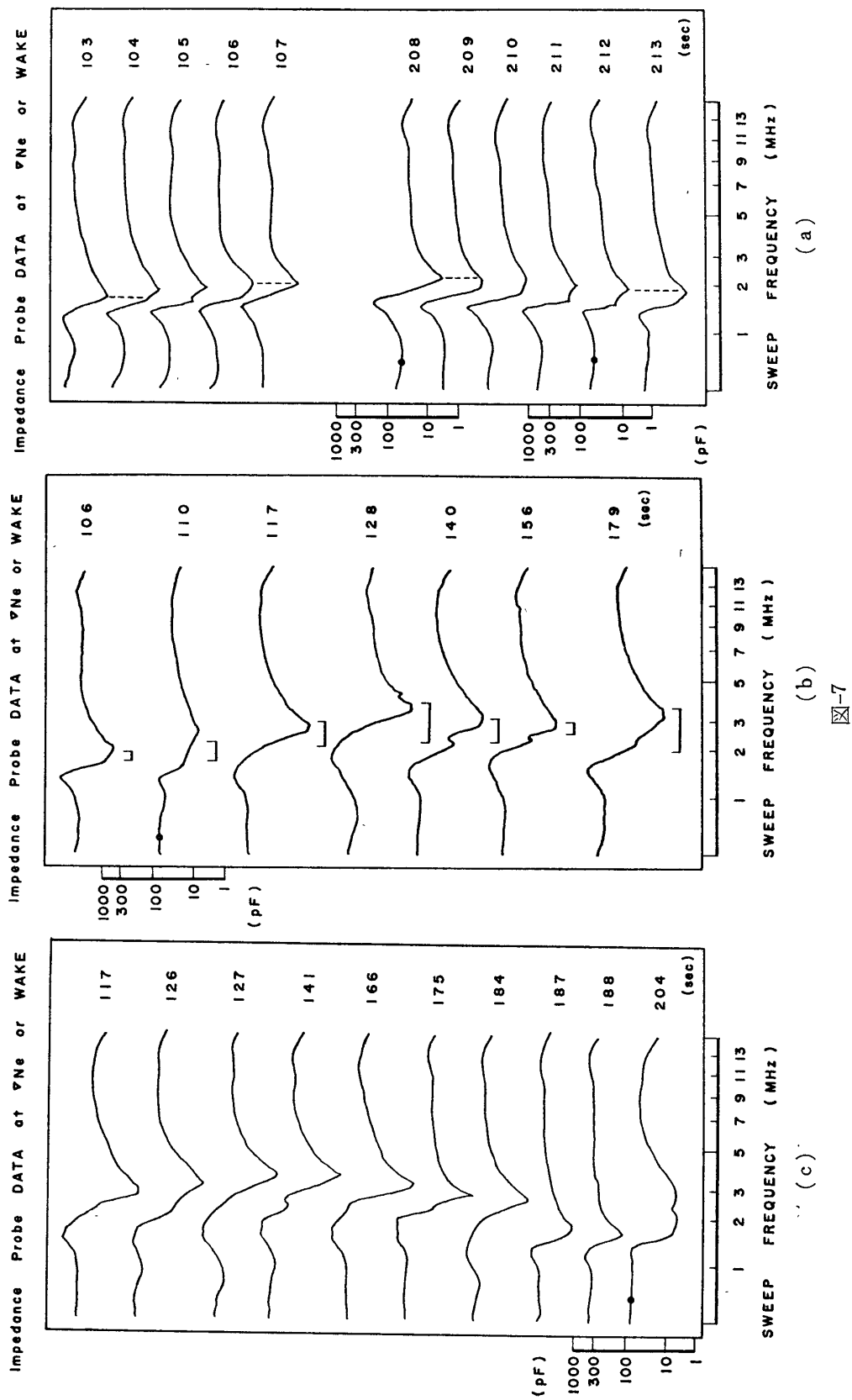


図-6



結果を XY プロッターで打点したものである。右側に電子密度分布状態を示す。それぞれ、横軸はプローブの長さを表わし、縦軸は、電子密度を示している。左側にそのときのプローブアドミタンス周波数スペクトルを示す。一様分布のときには、従来通りの応答を示し、電子密度が高くなれば、シースレゾナンス周波数、高域ハイブリッド共鳴周波数ともに、周波数の高い方へ移っている。次に、電子密度が階段状に分布して、一部に落差を持っているときには、その一様部分の分布量の比率に従って、それぞれ左に示す応答スペクトルを示した。二つの一様部分に正確に対応して、特徴あるシースレゾナンスと高域ハイブリッド共鳴を起こしている。図-7 の (a), (b), (c) に、S-210-6 号機で得られたこう配特性を示すインピーダンスプローブのデータを示す。(a) において、103 秒では WAKE の内で、107 秒では WAKE のそとで普通のレゾナンスを起こしているが、その間では、明らかに上述のこう配特性が出ている。また、(b) では、図-3(a), (b) の電子密度高度分布における WAVE 構造の谷が WAKE 内の電子密度を示し、山が WAKE 外の電子密度を示しているとして、それぞれのこう配特性を検証したものであるが、良く合っており、特に、山側での一致が良好である。(c) には、シースレゾナンスのこう配特性例を示すが、特に、204 秒のデータは、降りの 104 km のデータで、非常に落差の大きな電子密度こう配特性を示している。また、3.6 MHz での小さな山は、後述の $3f_H$ の応答したものである。

図-3(b) の降りの電子密度高度分布の 104 km 付近の凹みの部分の大きい黒丸の値は、ここで述べたこう配特性を示したデータより求めたものである。

4. WAKE の中心点での インピーダンスプローブ

図-8 は、インピーダンスプローブの一連のデータを並べたものであるが、電子密度と地球磁場には関係なく、正確に SPIN 周期で特徴ある応答が現われた。

すなわち、0.2 MHz~1.2 MHz 帯では凹みになり、3.0 MHz~12.5 MHz 帯では、丸い山になって、1 データ 1 個ずつ規則正しく観測された。これは、全飛しょう中観測されていて、顕著でないのは、現象がシースレゾナンスや高域ハイブリッドレゾナンスに近い

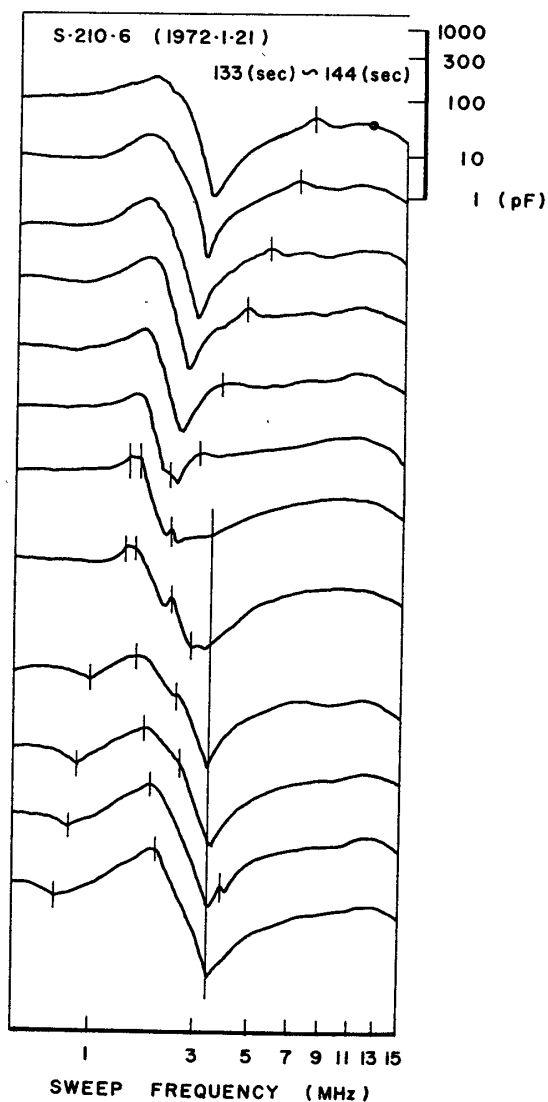


図-8

たときだけであった。これらの丸い山と凹みは、同一原因による二つの現われ方であると思われるが、これらの現象がシースレゾナンスに近づくと、シースレゾナンスがジャイロレゾナンスに近づき、また、レゾナンスの Q 値が劣化して丸みをおびてきた。さらに高域ハイブリッドレゾナンスに近づくと、その Q 値が悪化して、明らかに影響を与えているのがわかる。スピン周期で影響するものとしては、WAKE の効果と、プローブが磁場を切って生じる誘導起電圧の効果が考えられるが、前記のようにロケットの飛しょう姿勢が良くなかったので、定性的な説明にとどめる。まづ、WAKE の中心の電子密度がきわめて小さいときには、インピーダンスプローブは真空中の応答に近い応答をすると考えられるが、真空中でのプローブ特性は、周波数に依存しないで一定値を示すから、掃引中に、低周波部で WAKE 中心にプローブがくれば、応答は谷になり得るし、また、高周波部で WAKE 中心にくれば山になり得ることになり、上記データを説明可能である。図-9 は、飛しょう時刻を横軸にして、縦軸に、それぞれプラズマ周波数、ジャイロレゾナンスの高調波、高域ハイブリッド

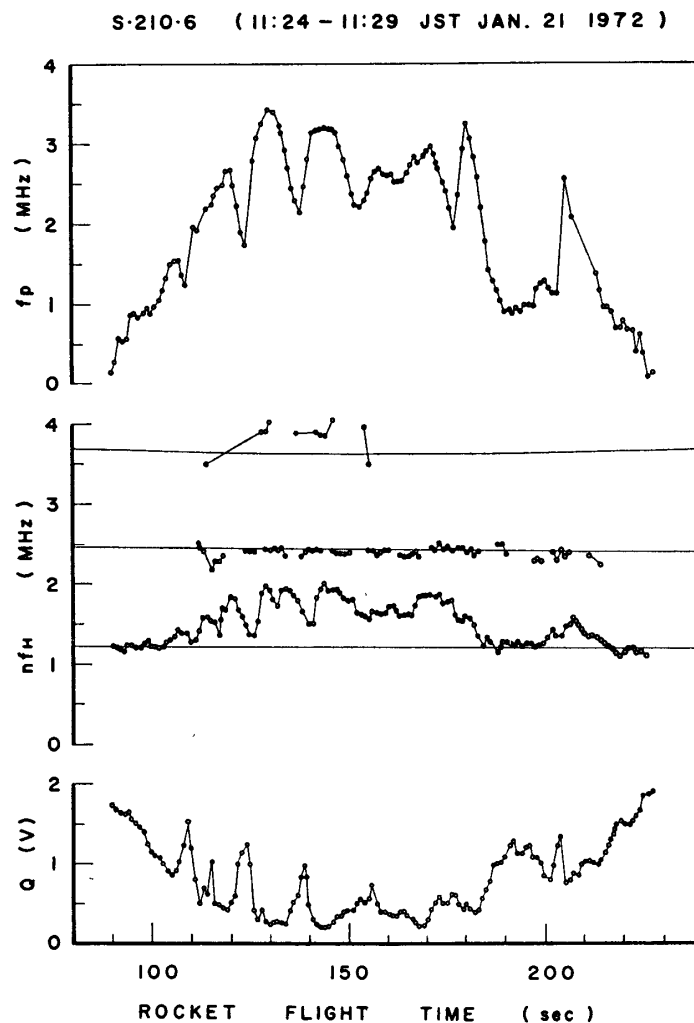


図-9

レゾナンスの最下点のレベルをプロットしたものであるが、これから、WAKE 中では、レゾナンスの Q 値が劣化していることが良くわかる。また、シースレゾナンスがジャイロレゾナンスになる点でも符合している。一方、プローブが地球磁場をロケット速度とスピン速度の和で横切ったときには、プローブ端にはば、スピン周期で正弦波状に数 10 mV の誘導起電圧が生じるが、これがキャパシタンスプローブとラングミュアプローブに与えた影響については、後述し、ここでは、インピーダンスプローブに与え得る効果について簡単に述べる。まづ、これによって、シースの厚さと形状が変わることが考えられるが、データ例より明らかに周期的にシースが薄くなっていると考えられるから、プローブポテンシャルをプラズマポテンシャルに近づけるだけの誘起電圧量があれば、原因として考えて良いことになる。次に、プローブ側トランジスタのバイアスに影響を与えて、そのトランジスタの増幅率と入力容量を変化させることが考えられる。図-10(a)は、真空中のプローブアドミタンス周波数スペクトルを示し、(b)は通常のパラズマ中の周波数スペクトルを示し、(c)は、プローブ側トランジスタの増幅率を 1.04 倍にし、入力容量を約 2 倍にしたときのプローブアドミタンスの計算結果を示す。(c)の場合、正常な応答とは異なったものになり、この

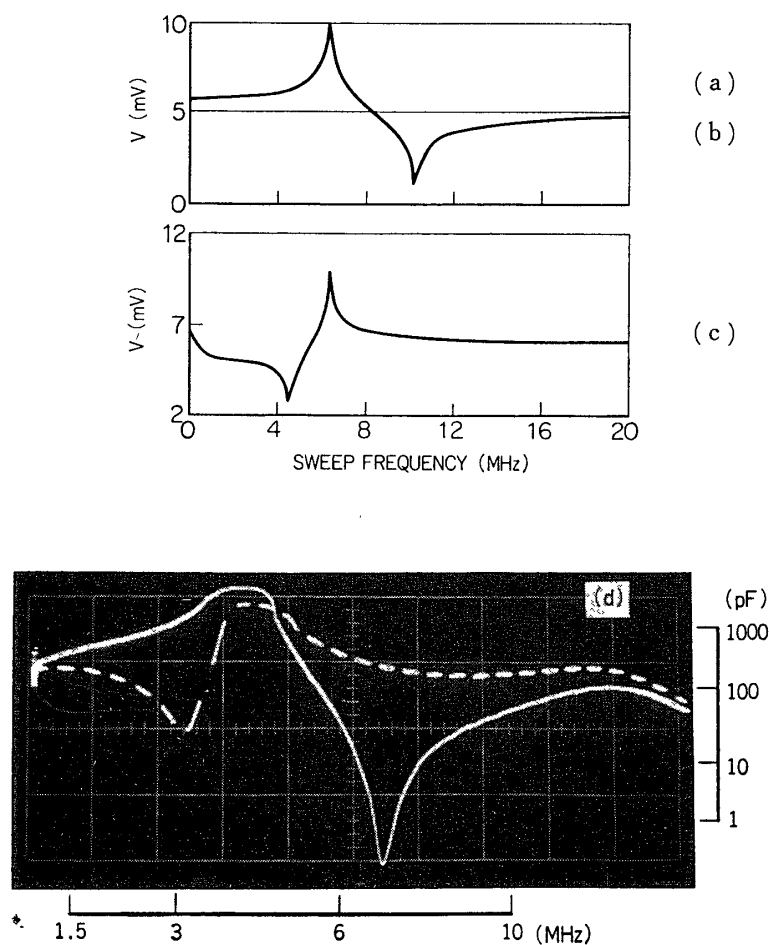


図-10

ときにも、前述と同様に観測データを説明することが可能である。図-10(d)の写真は、実際にインピーダンスプローブのプリアンプの中にあるトランジスタのバイアスを変えたときの出力と、正常な応答時の出力を重ね撮りしたものであるが、上記計算結果とは良く一致している。この状態までバイアスを変動させるには、数 100 mV の誘導起電圧が必要であるが、搭載機器に使用したトランジスタとそのバイアス条件によるので今は議論できない。これらの丸い山は、後述の nf_H とは区別しなければならないものである。また、凹みは、極地方で検出されているプラズマレゾナンスの凹みとも識別しなければならない。さらに、これらの現象が、高域ハイブリッドレゾナンス周波数に重なって生じたときには、その周波数を変動させていることが考えられるので今後の検討が不可欠である。

5. nf_H の 検 出

図-11 に、ジャイロレゾナンス周波数の高周波がシース容量で変調されて、丸い山の形で受信されているインピーダンスプローブのデータ例を示す。これらは電子密度に依存せず、地球磁場に依存することが明らかにわかる。図-9 には観測されたすべての nf_H の値をプロ

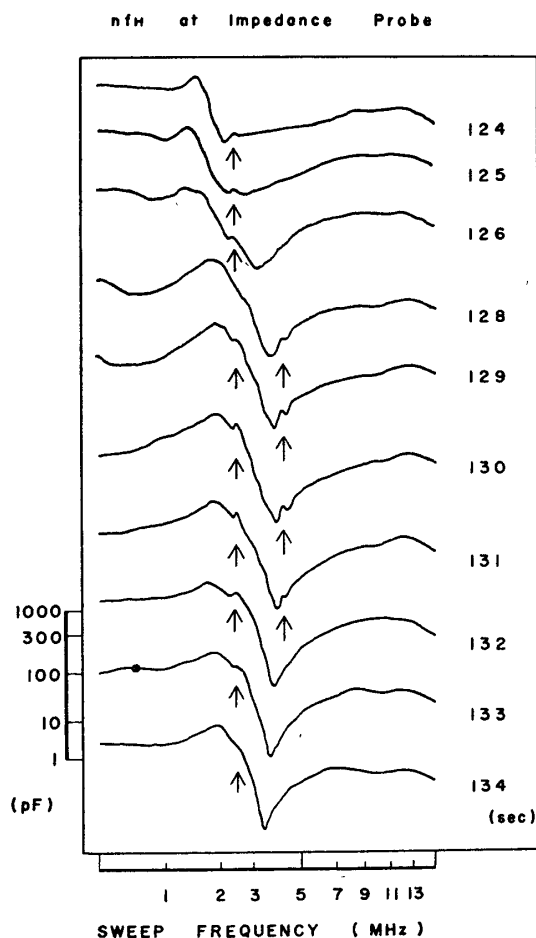


図-11

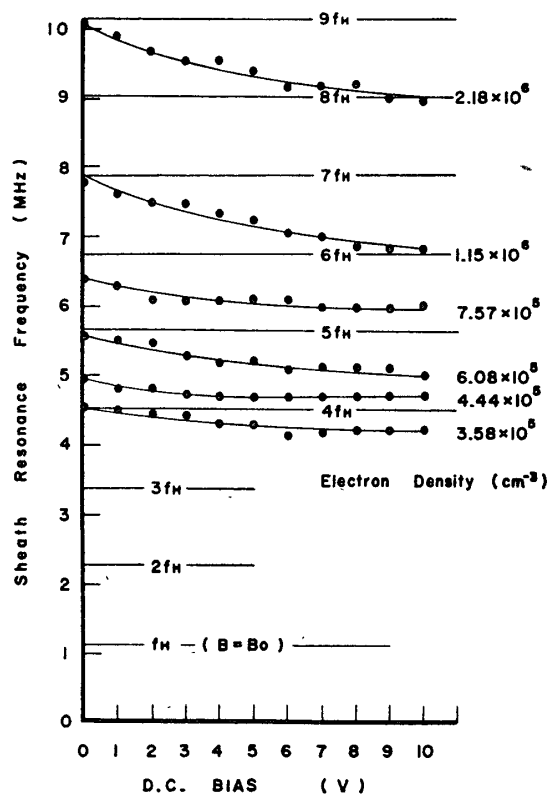


図-12

ットしているが、高次になるほど、磁場依存性が明らかであるが、 f_H はすべてシース効果を受けてシースレゾナンス周波数になっており、WAKE の影響を受けて変動している。これらの各ピークはすべて、電子密度が高くなれば、main series RESONANCE を形成するもので、通常シースレゾナンスと呼ばれているものに変化して行くが、S-ロケットでは高電子密度領域まで飛しょうしないので、1 倍のジャイロ共鳴がシース共鳴になっている。図-12 は、宇宙研大型スペースチェンバで得たものであるが、種々の電子密度のプラズマの中でインピーダンスプローブに DC バイアス電圧を印加して行ってシースを消去させたときのシースレゾナンス（主直列共鳴）周波数をプロットしたものである。これから、それぞれのシースレゾナンスが、何番目のジャイロレゾナンスがシースと作用して構成していたかが明らかにわかる。

6. プローブ端誘起電圧によるラングミュアプローブとキャパシタンスプローブの変調

このラングミュアプローブには約 2.7 V の DC 固定電圧が印加されており、ラングミュアカーブにおける飽和電子電流を得てプラズマ中電子密度を求めることを目指していたが、実際に得られたデータは三種類に分類することができ、(i) 測定時間中一定値を示すもの、(ii) 一部に凹みを生じるもの、(iii) 1 サンプリング 1 サイクルの形で正弦波状に変化するもの、の三つの代表的データを得た。特に、(ii) と (iii) は、LP1 と LP2 がまったく 180 度で対応しており、(i) のデータ例には、HIGH・GAIN のもので飽和してしているものも含まれる。図-13 に、代表的なラングミュアのデータを示している。これは、前述のように正弦波状の誘起電圧がプローブ電位を変動させたためで、(iii) のデータは、プローブ電位がラングミュアカーブの傾斜部の中心にきて、そこを中心に、正弦状に数 10 mV 変動したために、プローブ電流も同様に変動して記録されたものである。したがって先に述べたように、求められる電子密度値は他の値より小さくなっている。しかし、プローブの電位はほとんどフローティングポテンシャルからプラズマポテンシャルの領域まで正弦波で振られたものもあって、これからスピ周期、電子温度も求められることがわかる。

同様に、キャパシタンスプローブにおいても、同周期でプローブ電位が変わるから、それによってシースの厚さが変化して、メッシ

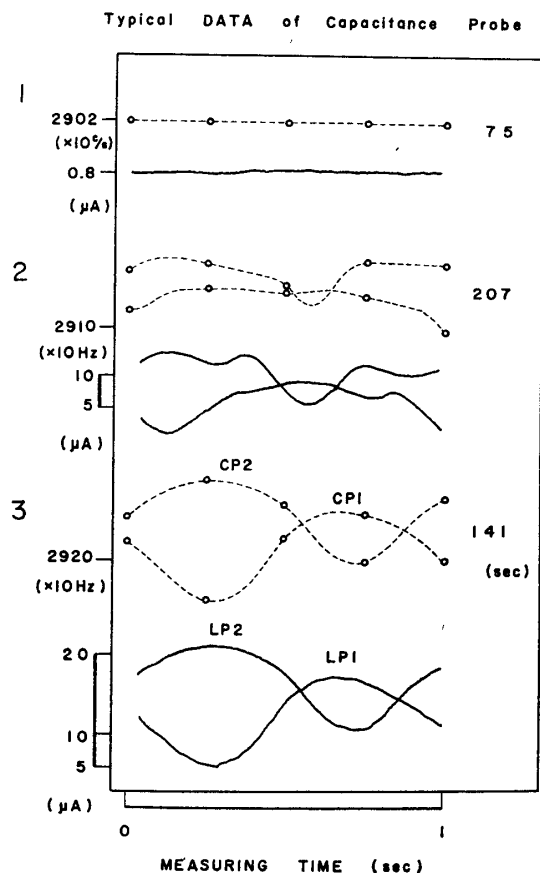


図-13

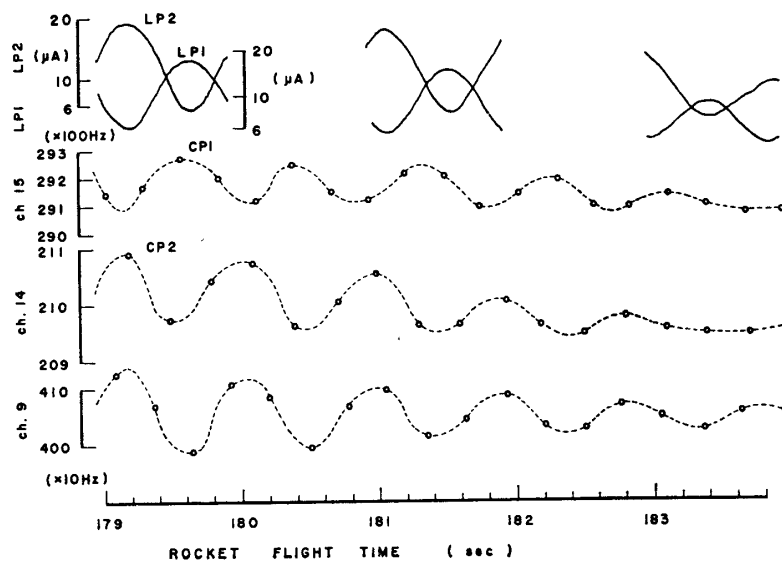


図-14

間の容量が変動し、発振周波数が FM 変調されることになる。図-14 にラングミュアプローブとの対応を示すが良く一致している。この場合にも、スペースポテンシャルでシースが消え、フローティングポテンシャルでシースの厚さがデバイ長に比例すると仮定すれば、それぞれの発振周波数から電子温度が計算できる。

7. 結 言

S-210-6 号機ロケットに搭載されたインピーダンスプローブ、キャパシタンスプローブ、ラングミュアプローブにより、下部電離層の観測がなされ、約 72 km~110 km の領域の電子密度測定に成功した。

また、地上で同時に観測したアイオノグラムの f_oE の値より算定した電子密度の値とも良く一致した結果を得ることができた。さらに、非一様電子密度中でのインピーダンスプローブの応答データを得て、これを理論的に検討できた。また、プローブが地球磁場を切って生じる誘導起電圧の効果が、各観測データに現われており、これらを考察できた。最後に、1973 年 1 月に打ち上げが予定されている S-210-8 号機ロケットに搭載するキャパシタンスプローブについて述べる。次回のセンサは外径が 5 cm、内径が 1 cm、筒高 8 cm の同心円筒形の金メッキメッシュをプローブとしたもので、基本発振周波数は、10 MHz にすることが計画されている。測定方式は 6 号機と同様であるが、次回は発振部を発泡スチロールで包み、発振部の温度効果を考慮するために、ヒータとバリスターを用いた温度センサをセットしている。また、飛しょう中に三度、基本発振周波数を校正するために負の高電圧を印加する。さらに、プローブ端誘導起電圧を小さくするため、回転半径を極く短かくしており、WAKE の効果を逃れるためにロケットの先端にセンサをセットしている。また、プローブをラングミュアプローブとしても、同時に使用し、測定しており、0 V~5 V の三角波掃引電圧を印加して、普通のラングミュアカーブを得て、電子密度と電子温度の情報も得ること

を計画している。これは同時にキャパシタンスプローブの DC バイアス特性について調べることになる。また、センサの形状による相違と、おのおの場合の理論との対比等、これからの検討項目は多いが、地上の大型スペースチェンバ、小型チェンバなども活用されて、さらに大きな成果が期待されるものである。

おわりに、本実験は東京大学宇宙航空研究所の特別事業として行なわれたもので、特に、観測ロケット実験班の各位に心から深甚の謝意を表します。また、6号機並びに8号機ロケット搭載用キャパシタンスプローブの製作にあたられた明星電気株式会社の方々に感謝致します。

1973 年 1 月 31 日 宇宙科学

参 考 文 献

- [1] 大家 寛, 大林辰蔵: インピーダンスプローブによる起高層プラズマ探測, 宇宙研究所報告, 2, No. 3(B), 1066 (1966)
- [2] Oya, H. and T. Obayashi: Rocket Measurement of the Ionospheric Plasma by Gyroplasma Probe, Rep. Ionos. Space Res., Japan, 21, 1 (1967)
- [3] Ejiri, M. and T. Obayashi: Measurement of Ionosphere by the Gyroplasma Probe, Rep. Ionos. Space Res. Japan, 23, No. 1, 1~12 (1970)
- [4] 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)
- [5] Heikkila, W. J., J. A. Fejer, J. Hugill and W. Calvert, Comparison of Ionospheric Probe Techniques, Space Research VII 396~405 (North-Holland Pub. Co.) (1967)
- [6] 江尻全機, 大林辰蔵: キャパシタンスプローブによる電子密度の測定, 宇宙観測シンポジウム(昭和 45 年度) 東京大学宇宙航空研究所 (1970. Nov.)
- [7] 江尻全機, 渡辺勇三, 大林辰蔵: キャパシタンスプローブの基礎的実験, スペースプラズマ研究会, 東京大学宇宙航空研究所 (1970)
- [8] 江尻全機, 渡辺勇三: The Determination of electron density by the Capacitance Probe, 第 49 回日本地球電気磁気学会講演予稿集 (1971)