

電離層プラズマを用いた2つの RFプローブの比較実験*

南 繁行**・竹屋 芳夫**

Comparative experiments of two type r.f. probes
in the ionospheric plasma

By

Shigeyuki MINAMI and Yoshio TAKEYA

Abstract: The resonance probe is a type of radio frequency probe, which was developed 15 years ago. At first, the relationship between resonance peak characteristics and the plasma parameter were studied. Actually electron density determination using the resonance probe is very difficult because sensitivity of anti-resonance dip which gives electron density, is very low, and usually it is masked by plasma noise and potential drift. The differential resonance probe which was developed in order to avoid these impediments, has two symmetrical floating probes. One acts as a single resonance probe, while the other one gives the reference floating potential of plasma. Using a differential amplifier, common mode noise is removed. In this paper, the properties of the differential resonance probe which show anti-resonance clearly are considered, together with the accuracy of the probe.

At first, the theoretical approach of the resonance probe in magneto plasma is performed using plasma impedance theory at radio frequency. It is shown that anti-resonance frequency of the resonance probe is upper hybrid frequency, the same as in the impedance probe.

Second, the experimental results are compared with theoretical calculations. Comparison of properties of the differential resonance probe are performed using low temperature (about 0.1eV) and low density ($10^4 - 10^6$ el/cc) in space simulation chamber (diameter 2m, length 3m) using back diffusion type plasma source, and ionospheric plasma using sounding rocket. Experimental results show that electron density computed by the above two methods agree with an error range of \pm several percent in uniform plasma.

* 宇宙研特別事業費による研究論文

** 大阪市大工学部

Deviation of the results of electron density by impedance probe from the results of the resonance probe occur when the potential difference between plasma potential and potential of rocket body or probe supporter is large. The resonance probe has an insulated probe bottom to escape the sheath of the capacitance. This effect of apparent low density measured by the impedance probe is verified by laboratory experiments.

概 要

新しく開発された改良型レゾナンスプローブを用いて電離圏E層の電子密度を測定した。この結果は、同時に搭載されたインピーダンスプローブと共に比較検討された。そして今迄のインピーダンスプローブのデータの測定結果はほぼ信頼できることと既にドップラー法との比較実験で指摘されているロケット電位の沈下による測定誤差の効果について確かめた。

本論文では改良型レゾナンスプローブでの測定結果及びその特長について述べる。

1. ま え が き

現在までに幾つかの電子密度プローブが開発され電離層プラズマの測定に用いられてきた。そのうち現在信頼のおける測定法 [1] の1つとして標準化されつつあるインピーダンスプローブは多くの電子密度プロファイルを測定してきた。ところで全く別の方法として、VLF波のドップラー測定からロケットの周辺のプラズマの密度を測定するドップラー法 [2] がある。このドップラー法と上のインピーダンスプローブの同時比較測定を行なった結果によると、両者には系統的な差異があらわれた [3]。この原因についてはロケット近傍の密度減少とロケット電位の関連によるインピーダンスプローブ法での共鳴値の減少が指摘されている。結局これらの測定の差異は、測定対象プラズマのスケールとの関係によるわけである。

一方、ラングミュアプローブに掃引高周波を重畳してその非線形整流電流から得られる信号によりプラズマインピーダンスを知る方法がレゾナンスプローブ法で、これは最も古典的な高周波プローブ法である。この方法で電子密度に対応するプラズマの反共振を検出することは通常その感度の低さのために困難であった [4]。我々は1対のプローブの片方にのみ掃引 RF 電圧を重畳し、もう一方のプローブを参照フローティング電位として利用する改良型のレゾナンスプローブを開発した [5]。この場合、従来のレゾナンスプローブに較べ、プラズマの反共振付近を強調したままで全体の特性、特にシースレゾナンス付近を圧縮でき、ダイナミックレンジを小さくすることができる。レゾナンスプローブは特徴として、プラズマの直流電流成分を検出するために、プローブの金属部分でのみ測定が行なわれ、測定領域を明瞭に分離することができる。このためロケット近傍に生ずる電子密度の減少する領域をさけてプラズマインピーダンスの情報を得ることができる。ちなみにインピーダンスプローブはこのように明瞭に測定領域を分離することができない。

我々は観測ロケット S 310-2 を用いてこの改良型レゾナンスプローブとインピーダンスプローブの同時比較実験を行なった。その結果と上に述べたような誤差の問題について述べる。

2. 測定器

レゾナンスプローブは高周波重畳によるプローブ直流成分の変化を測定するが、この改良型レゾナンスプローブはこの変化をプローブ浮動電位の変化として第1図(c)のように検出する。ここで V_p はプローブ電位で I_p はプローブ電流である。高周波重畳によりプローブ浮動電位は V_1 までシフトする。高周波電圧が印加されていないもう一方の参照信号用プローブでフローティング電位 V_0 を得ることができ、この両者の電位差のみを差動アンプで検出することにより、同相電圧が除去され、 S/N の向上した特性が得られた。

第2図に実験に用いた装置のブロック図を示した。ここで一対のプローブは差動レゾナンスプローブで、これは抵抗 R で終端されている。この終端抵抗 R によってレゾナンスプローブ特性のシースレゾナンス付近のピークが圧縮され、単一レゾナンスプローブにはなかった特性全体の高感度増幅とダイナミックレンジの減少及びディップ周波数の明瞭化が得られた。抵抗 R で終端された時、差動電圧 ΔV_f はいかなるプラズマの直列共鳴においても

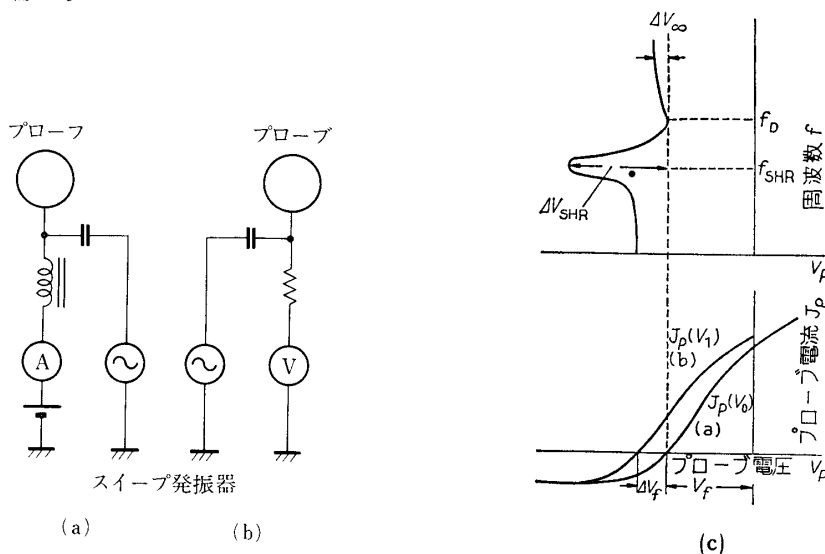
$$|\Delta V_f| \leq J_{i0} \cdot R \tag{1}$$

になる [6]. ここで J_{i0} はプローブのイオン飽和電流である。このレゾナンスプローブにおいて特性のディップ周波数は磁化プラズマ中では、インピーダンスプローブと同様上部ハイブリッドレゾナンス周波数 f_{UHR} になることがわかった [7]. 即ち、

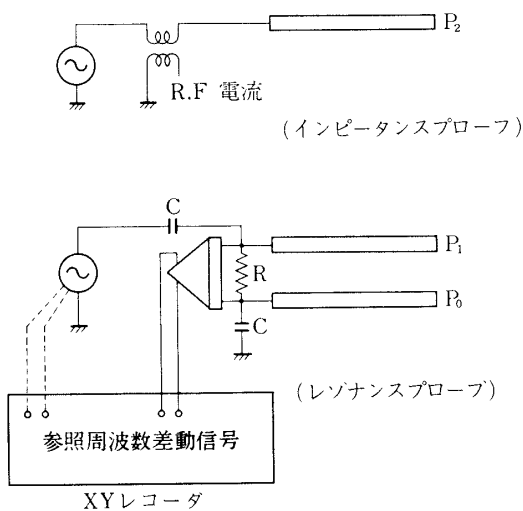
$$f_{UHR} = \sqrt{f_{pe}^2 + f_{He}^2} \tag{2}$$

ここで f_{pe} はプラズマ周波数、 f_{He} は電子サイクロトロン周波数である。従ってこの周波数を特性から求めることにより電子密度が決定できる。いま一例として実験に用いたプローブ (直径 6 mm 長さ 500 mm) において電子密度 N_e が 5.5×10^5 [el/cc] の時

- (a) 終端抵抗 R が $1 \text{ M}\Omega$
- (b) 終端せず



第1図 レゾナンスプローブの基本的な方法

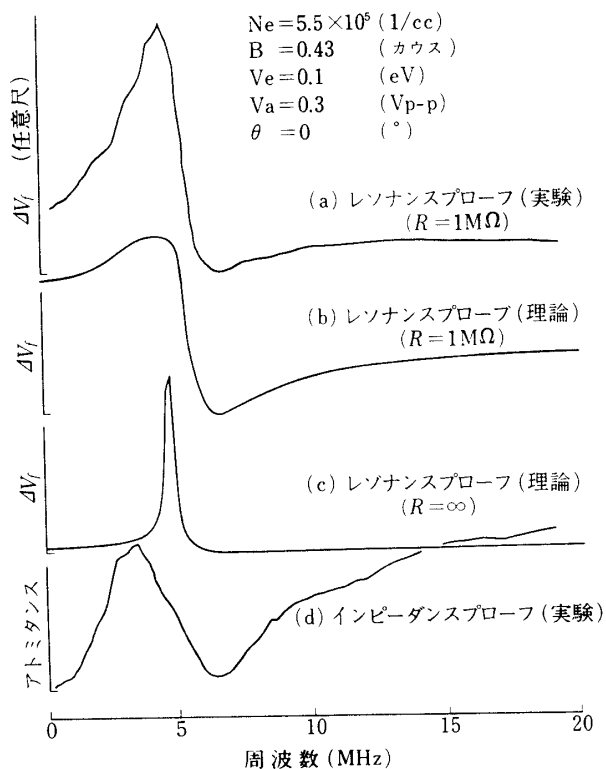


第2図 実験装置のブロック図

の時の特性を数値計算した結果を第3図に示した。

必要な他のパラメータ B (外部磁場) V_e (電子温度) V_a (印加高周波電圧) θ (プローブ軸と磁界のなす角) を図中に示した。

第2図においてインピーダンスプローブは広帯域カレントトランスをもった電流検出器型



第3図 地球磁場中でのプローブ特性の比較の例

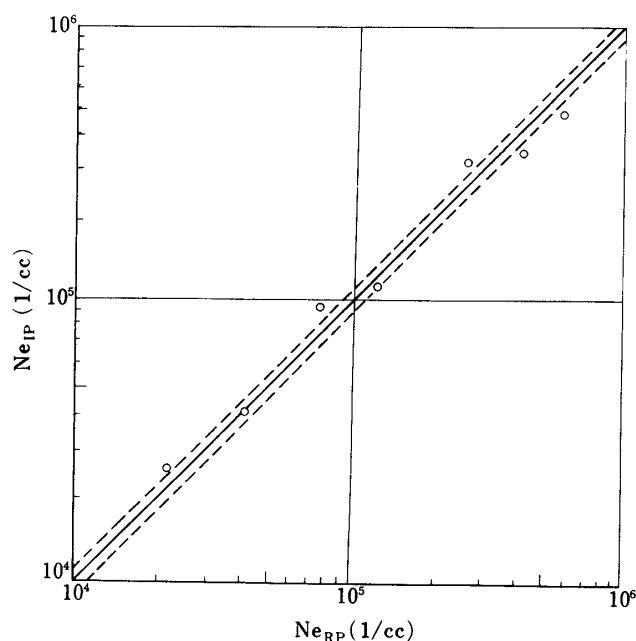
である。このトランスはプローブを取り外した時、出力がないように工夫されている。

3. 実験結果

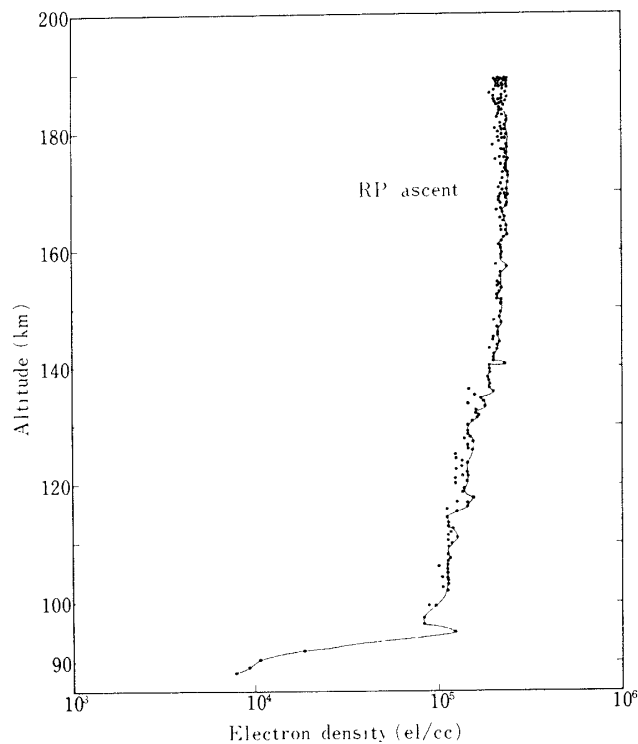
先に述べた2つの r. f. プローブを用いてスペースチャンバ（直径2 m, 長さ3 m）中で比較実験を行なった結果を第4図に示す。ここで点線2本は誤差10%の範囲を示している。ここで電子温度は約0.1 [eV]であった。電離層プラズマに相当する電子密度範囲において式(2)から得た2つの r. f. プローブの電子密度値はよく一致することがわかった。

次に過去のロケットに搭載したインピーダンスプローブによる数々のデータのチェックのためにこれら2つの r. f. プローブがS 310-2号機に搭載された。このロケットは高度190 km まで上昇し、その間約700フレームの電子密度データが得られた。このロケットは1975年8月30日13時10分 J. S. T. に K. S. C. から打ち上げられた。この時得られた結果の $N(h)$ プロファイルを第5図に示す。ここで実線はレゾナンスプローブ、点線はインピーダンスプローブでの値を表わしている。ここで天頂角 χ は25度であった。得られたプロファイルは上昇時にスポラディックEをもつが全体として典型的な太陽静穏時のE層のプロファイルを示している。第6図にこの静穏時において過去に得られたロケット観測データを示す[8]。今回の観測は $\chi < 30^\circ$ に対応し良くこのモデルに一致している。

次に得られた2つのプローブによる電子密度について比較した結果を第7図に示した。殆んど全てのデータが10%以内に入った。この値を発射後の時刻について示したのが第8図である。高度150 km 以上では両者はよく一致した電子密度を示し、しかもこの領域では電子密度は約400個のデータから平均値として



第4図 電子密度比較実験（室内実験）の結果



第5図(a) レゾナンスプローブ(RP)及びインピーダンスプローブ(IP)による $N(h)$ プロファイル

$$N_{eRP} = 2.19 \times 10^5 \text{ [1/cc]} \pm 3.6 \%$$

$$N_{eIP} = 2.24 \times 10^5 \text{ [1/cc]} \pm 3.2 \%$$

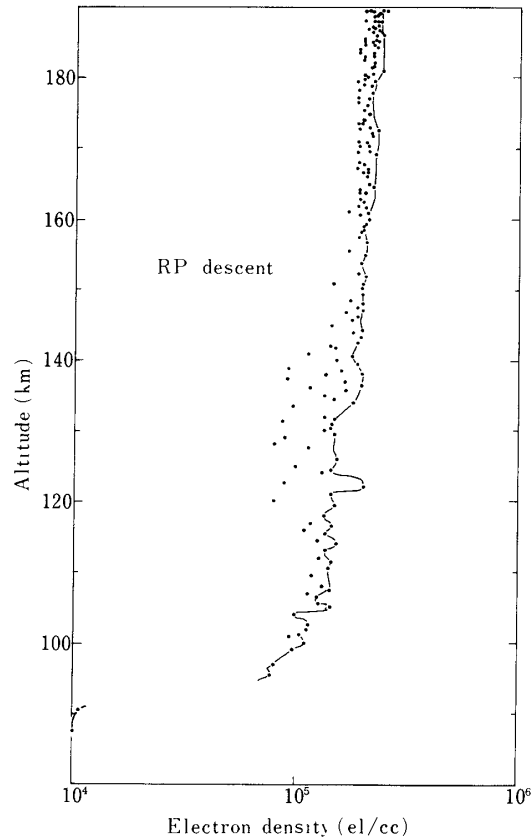
が得られた。ここで N_{eRP} , N_{eIP} は各々レゾナンスプローブ、インピーダンスプローブによる電子密度である。その分散値約3%というのは測定誤差というよりもむしろ電離層の密度の擾乱と考えられる。(同じ主発振器により両 r f. プローブは駆動されているため両者の周波数軸に相対誤差は生じ得ない。)

ロケットと周辺のパラズマの相対電位差 V_s を同時に示した。両者のプローブでの結果の誤差 η (%) は、

$$\eta = 100 (1 - N_{eIP}/N_{eRP})$$

と表わされるが、 η は高度100 km 付近では V_s と相関をもって大きくなっている。この意味は後で検討する。

次に同時に搭載された円筒(直径6 mm, 長さ50 mm)ラングミュアプローブとの比較結果を示す。その誤差は距離と共に増大することがわかった。この原因についても後で述べる。

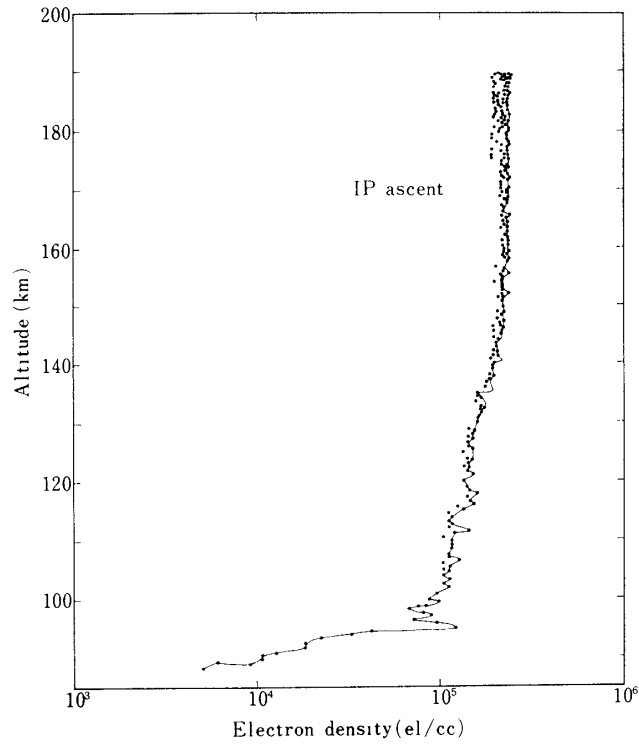


第5図 (b)

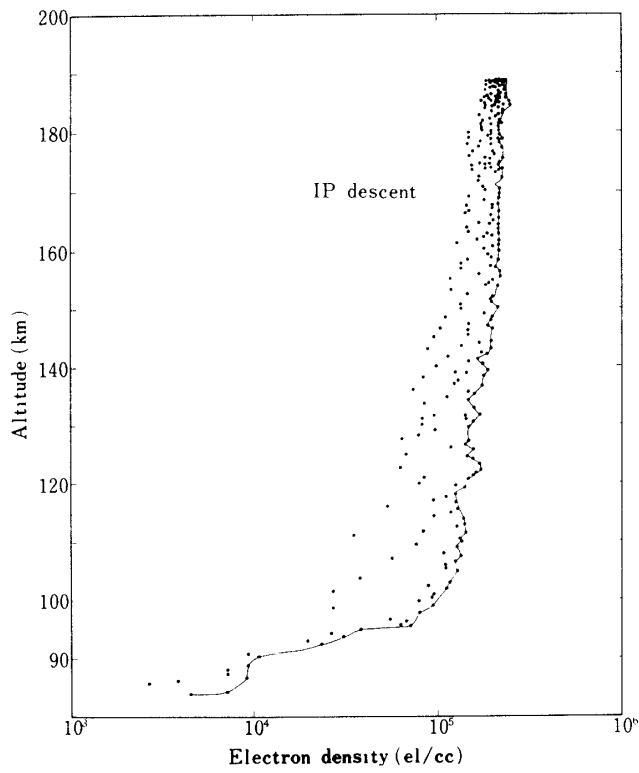
4. 検討と結論

まず最初にこの比較実験において、レゾナンスプローブとインピーダンスプローブの誤差 η について検討する。第8図によればその増大は V_s の増大と相関がある。ここで V_s はロケット機体電位がまわりのプラズマに対して負に沈んだ量を示す。従ってロケット機体近傍には電子反発領域が生ずる。このため測定用プローブの一部がこの領域に覆われることになる。この様子は第10図に示されている。ロケット壁からの距離と電位の関係及びプローブの位置関係を同時に描いた。インピーダンスプローブはプローブ周りのプラズマを測定するが、その一部が密度のうすい領域に入っていると、その反共振周波数 f_{UHR} を低くし、みかけの測定値を減少させる[9]。レゾナンスプローブも同様であるが、いまプローブの一部を直流的に絶縁被覆することにより、問題の領域をさけた測定領域を設けることができる。両者のプローブの本質的な違いが r.f. 検出か D.C. 検出かにある。今回の実験では 50 mm の被覆を行なった（デバイ長の約 10 倍に相当）。従って V_s が大きい時インピーダンスプローブでの結果は測定値を小さく指示する。

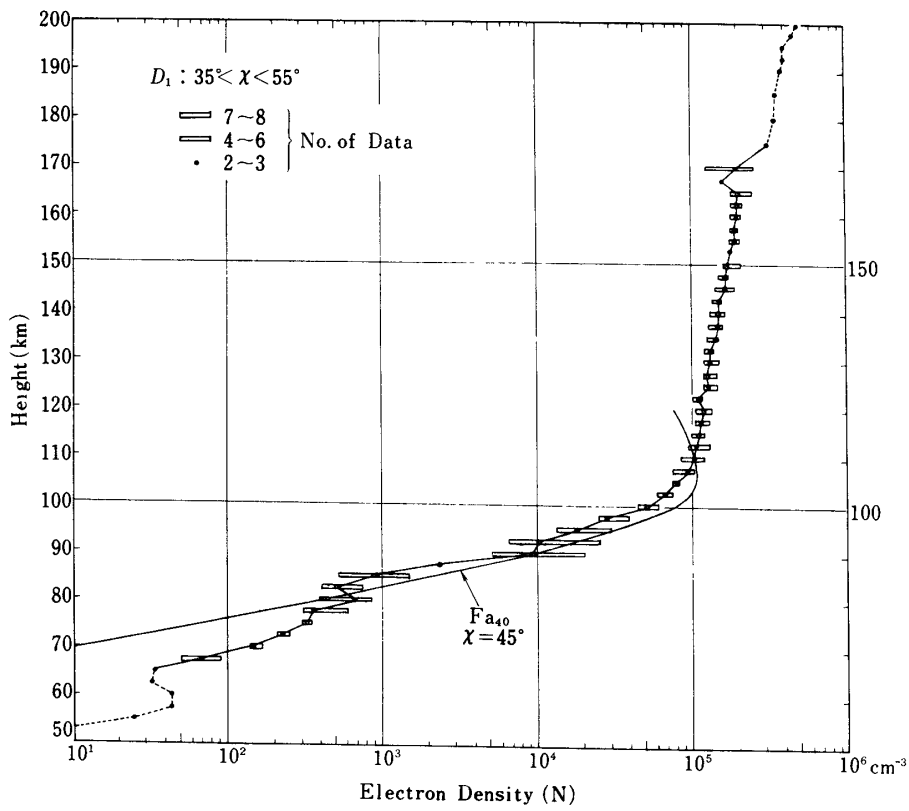
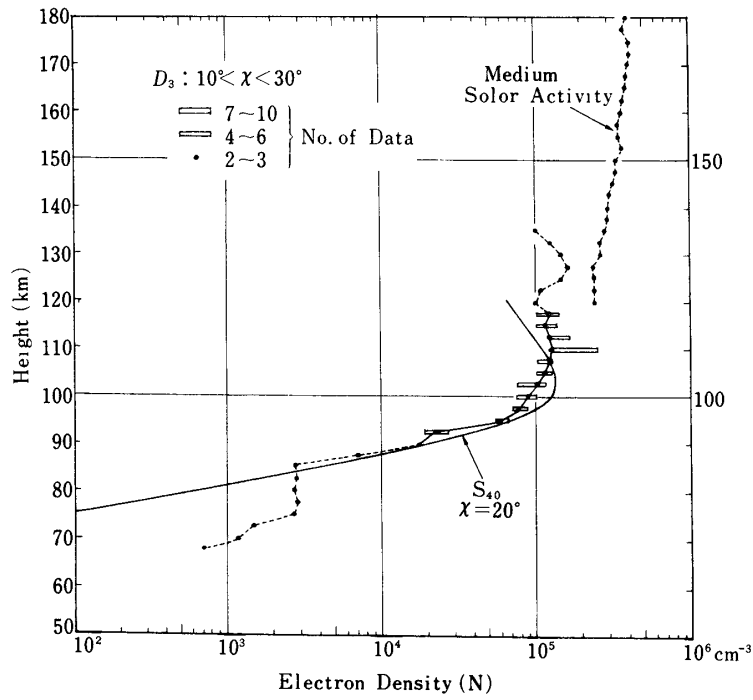
この様子は円筒ラングミュアプローブでも同様である。ラングミュアプローブにはこの処置は施されていなかった。この場合の測定誤差が漸増するのはプローブの汚染の進行による



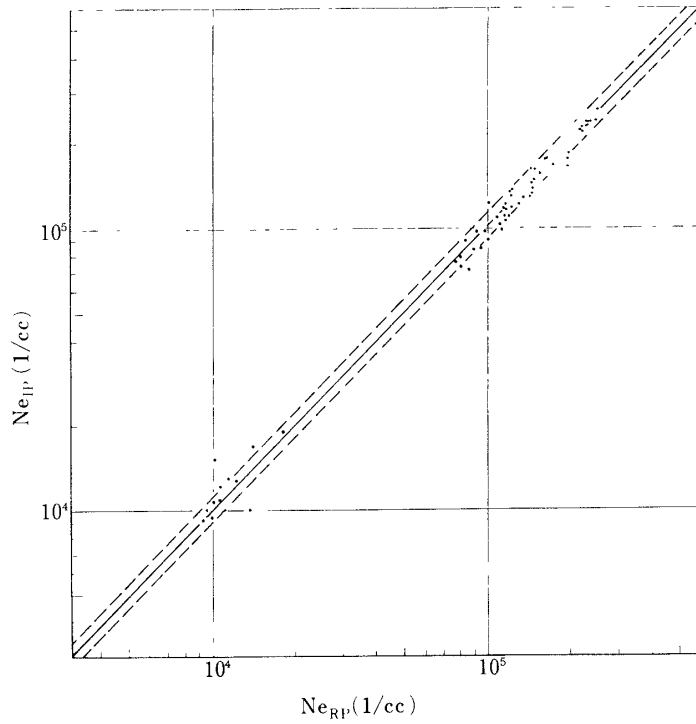
第5図 (c)



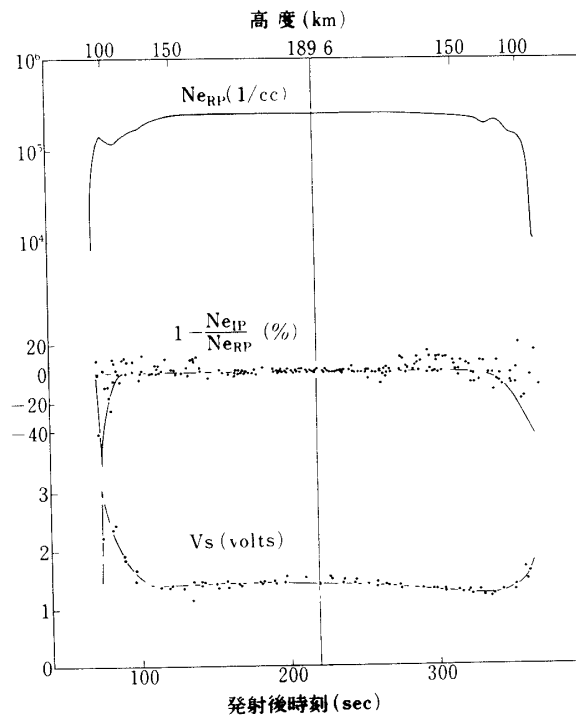
第5図 (d)



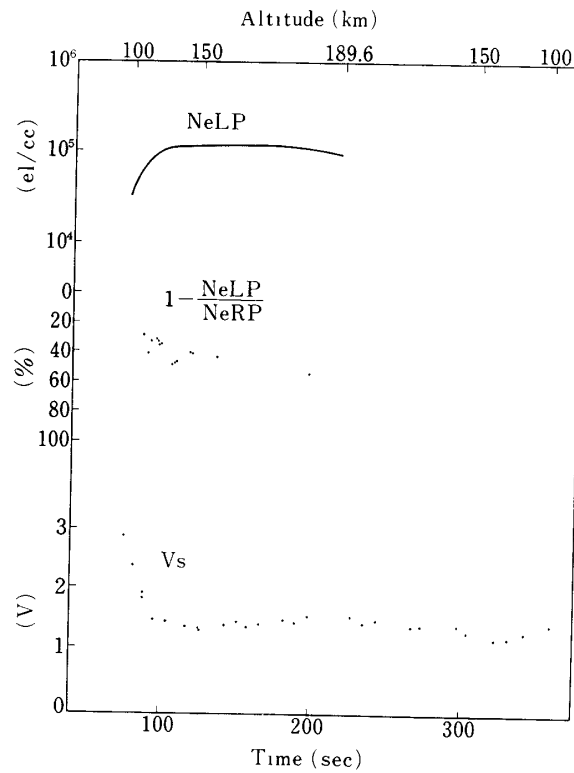
第6図 太陽活動静穏時のE層電子密度の例(前田による1970)



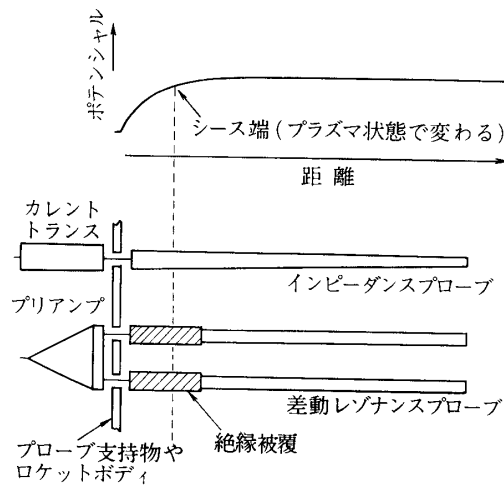
第7図 ロケット実験で得られた差動レゾナンスプローブとインピーダンスプローブによる電子密度の比較



第8図 観測ロケットによる電子密度測定結果と測定誤差



第9図 ラングミュアプローブとレゾナンスプローブの電子密度比較結果



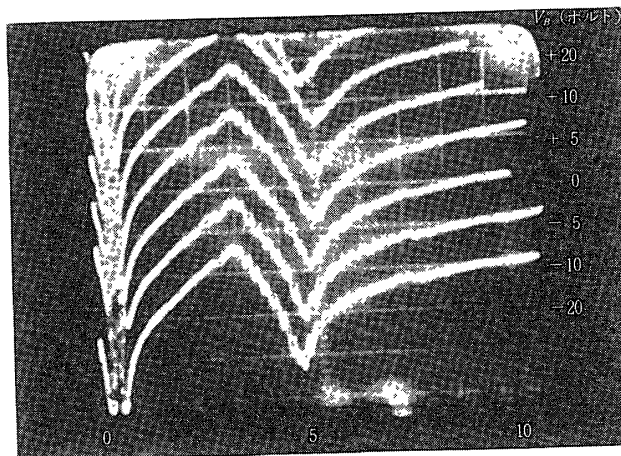
第10図 プローブ支持物によるプラズマの乱れと測定に及ぼす影響の模式図 (プローブまわりのシースは省略した)

のではないかと考えられる(このプローブは最初ベークされたガラスシール内にあり、高度60 km で取り去られた.)。

次に室内実験においてインピーダンスプローブ中のディップ周波数 f_D がそのプローブ基部近傍に取り付けた擬似ロケットボディ [10 cm × 10 cm] によって変化するかどうかを調べた。第11図に示すように明らかなディップ f_D の変化がみられた。この場合、プラズマとシミュレイテッドボディとの電位差を V_B とした。ここでシーズレゾナンスが変化しないのは、プローブ自体はフローティングポテンシャルに固定されているためである。 V_B がほぼ零の時、 f_D はプラズマの f_{UHR} に一致する訳である。レゾナンスプローブにおいても絶縁シールをしなければ同様の効果があらわれた。

結論として今回の実験において次のことがわかった。

- (1) 両測定プローブとも電子密度を f_{UHR} から得ることができる。そのデータは $1 \times 10^4 \sim 10^6$ [1/cc] においてよい一致を示した。
- (2) 太陽活動静穏時での典型的な電子密度プロファイルを80 km から190 km にわたって得ることができた。特に150 km 以上の電子密度の一様性とその分散が測定された。
- (3) これまでのインピーダンスプローブでの数々のデータは一部、次のように考慮せねばならぬ領域を除いて信頼できる。但しロケット電位 V_S がきわめて大きい時(これ



第11図 機体電位 V_B によるディップ周波数の依存性
(インピーダンスプローブ)(横軸1 MHz/d, 縦軸10 dB/d)

はラングミュアプローブ等による大振幅電圧掃引,あるいは高周波発振,ホトエミッションなどによる)においては,この章で述べたような理由でその値は過少評価していたと言える.

- (4) レゾナンスプローブはプローブの高周波的な微妙な浮遊容量の調整が不要であり,構造の面でも簡単な装置であるため簡素化でき,ロケット搭載装置として有利であることが確かめられた.

通常のレゾナンスプローブでは $V \times B$ の効果で,不可能であった f_D の検出が差動法により可能になり,さらにダイナミックレンジの減少が確かめられた.この利点を利用して,搭載用とした差動レゾナンスプローブを用いた比較実験を行った.

この実験で御世話になった東大宇宙研の伊藤富造教授に御礼申し上げます.またラングミュアプローブのデータは郵政省電波研究所の森弘隆氏のグループより御提供頂きました.搭載装置は松栄電子KKの黒須晃毅氏に御世話になりました.ここに御礼申し上げます.

この研究の一部は東京大学宇宙航空研究所に設置された大型スペースチャンバでその共同利用研究としてなされた.

1977年8月20日

参考文献

- [1] H. Oya ; Rept. Ionos. Space Res. Japan, 22 119 (1968)
- [2] I. Kimura et al ; Rept. Ionos. Space Res. Japan, 25 59 (1971)
- [3] 木村他 ; 宇宙観測シンポジウム p44 (昭48)
- [4] T. Dote et al ; J. Appl. Phys. 36 1866 (1965)
- [5] 南 ; 電気学会プラズマ研究会資料 EP-74-14 (1974)
- [6] 南他, 電気学会論文誌 第97巻-A6号 p285 (1977)
- [7] S. Minami et al ; Memoirs of the Faculty of Engineering, Osaka City Univ. Vol 16 35 (1975)
- [8] K. Maeda ; J. G. G. 22 (4) 550 (1970)
- [9] H. Oya ; Rept. Ionos Space Res. Japan 20 199 (1966)