

交流レゾナンス法によるイオンプローブの開発*

竹屋 芳夫**・南 繁行**

The Development of the Ion Probe by the use of the AC resonance method

By

Yoshio TAKEYA and Shigeyuki MINAMI

Abstract: In this paper, a new method of measuring the ion density in the plasma is reported. To determine the plasma parameter by the measurement of frequency dispersion of plasma, is utilized as Impedance Probe method to determine the electron density effectively. The experimental result of measuring the ion parameter, is introduced. For this experimental method, we use an ion trap probe with mesh type grid. The result obtained by this AC method is compared with DC method ion trap.

概 要

プラズマ周波数分散を測定することによりプラズマパラメータを得る方法は、すでに電子に関する有効なインピーダンスプローブ法として活用されている。本論文ではメッシュグリッドを持つイオントラップ形のプローブを用いてイオンパラメータの測定を行なう方法につき実験した結果を述べる。本測定法で得られた結果（AC法）はイオントラップで得られた結果（DC法）と比較されている。

1. ま え が き

気体プラズマにおけるイオン密度の測定は従来から主としてイオントラップ法を用いて直流的に行なわれている。イオントラップは、メッシュグリッドとイオンコレクタをもち、電荷分離により、イオンのみを捕集する。しかしエネルギー分布を測定する方法という点で、電子を測定するラングミュアプローブ法と本質的には同じである。したがって温度を決定してから飽和イオン領域よりイオン密度が求まるが、実際測定にあたっては、メッシュの寸法により、イオン温度の決定に誤差が多いほか、メッシュの透過率、有効面積についても実測が困難である。また、プラズマ中ではしばしばイオンがマックスウエル分布をせず温度が定義できぬ場合があり、異方性をもつプラズマやビームをもつイオンの場合にはこの方法で密

* 宇宙研特別事業費による論文

** 大阪市立大学・工学部

度を知ることができない。1 例としてロケットで測定されるイオンはドリフトしているとみなされるが、入射面とのなす角等により測定は不確定になりやすい。

また多種類のイオンの混在する場合、合成分の絶対量を求めることも必要なことが多い。

本論文で述べる測定法は、イオンの存在する領域での等価誘電率の分散からイオンパラメータを独立に測定するものである。

実験にはメッシュグリッドをもつファラデーカップ形のプローブを用い、プラズマ条件(プラズマ密度、イオンの種類、磁場の強さ、およびプローブとのなす角、圧力)を変え、また測定法についてもグリッド直流バイアス V_g 、交流重量振幅 V_{ac} 、イオンコレクタ直流バイアス V_c 、プローブの形状および寸法を変えて行なった。

プラズマは、直径 20 cm の水銀放電拡散プラズマと、宇宙研に設置された直径 60 cm 長さ 1 m の小型スペースチェンバによるアルゴンおよびヘリウムプラズマを用いた。

2. 測定方法と実験装置

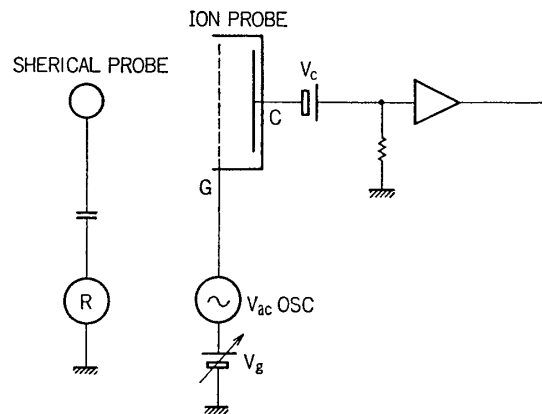
第 1 図は測定の模式図である。プローブは円筒形および平板形でメッシュグリッドとその内部にコレクタをもっている。グリッドは、交流周波数掃引電圧 V_{ac} と直流バイアス V_g が印加される。直流的にイオントラップ法で測定するときには V_g を電圧掃引する。球プローブは、RF プロブ法 [1] により V_g を電圧掃引した場合の球プローブでの交流レスポンスの変化からグリッド近傍の空間電位を知るために用いる。

磁場を無視すれば、等方性プラズマの等価誘電率 $[K]$ は、

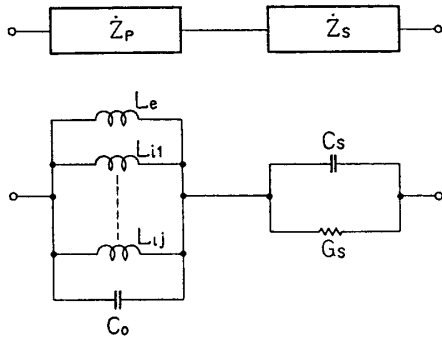
$$[K] = \epsilon_0 \left\{ (1 - \omega_{pe}^2 / \omega^2 - \sum_j \omega_{pij}^2 / \omega^2) \right\} \quad [K] = \epsilon_0 (1 - \omega_{pe}^2 / \omega^2 - \sum_j \omega_{pij}^2 / \omega^2)$$

として与えられる。ここで ϵ_0 は真空誘電率 ω_{pe} , ω_{pij} は電子および j 種のイオンのプラズマ角周波数である。 j 種イオンを含むプラズマの等価回路はシースを考慮して第 2 図のように書ける。ここで $L_e, L_{i1}, \dots, L_{ij}$ は電子、各成分イオンの等価リアクタンスである。プラズマでは、電子とイオンの質量のちがいでより $L_e \ll L_i$ となるため、通常電離層 HF 電波伝播等においては、イオン成分は検出されないし、無視される。ここで電子の L_e に相当する電流を電荷分離により除けば、分散はシースのコンダクタンス $G_s \approx 0$ のとき、第 3 図の特性を示すことがわかる。したがって単 1 種類イオンの場合は図中 ω_p' がイオンプラズマ周波数を決定し、イオン密度が独立に求まる。また多種類のイオンの場合 ω_p' は各質量と組成により有効質量 m_{eff} で決まることがわかる。さらに磁場が存在するときは、丁度電子におけるインピーダンスプローブ [2] と同様に、イオンジャイロ角周波数 ω_{Hi} に対し

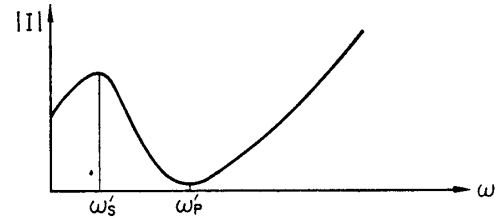
$$\omega_{pi}' = \sqrt{\omega_{pi}^2 + \omega_{Hi}^2}$$



第 1 図 実験法の模式図



第2図 プラズマ等価回路



第3図 電子の存在しないときのプラズマを流れる電流の分散 ($G_s \approx 0$ のとき)

となる高部ハイブリット共鳴相当のディップ点が生じると考えられる. この場合 j 種のイオンが存在すれば理論的には $[K(\omega)]$ の零点は各イオンのジャイロ角周波数の間に $j - 1$ 個存在することがわかる.

実験は図4のブロック図に示す方法で行ない, 結果をXYレコーダおよびオシロスコープに書かせた.

特徴的なことは, グリッドコレクタ間のプラズマをはさむ部分以外の浮遊容量を C_n なるコンデンサで中和をとることにより除去し, レゾナンスの最小点の感度をあげていることである.

水銀放電管を用いた実験とスペースチェンバで実験したプローブの寸法形状を図5・写真1に示す.

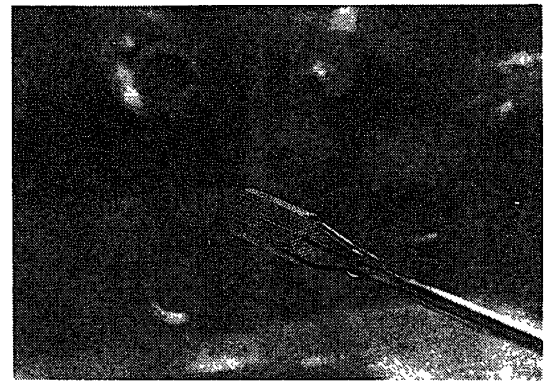
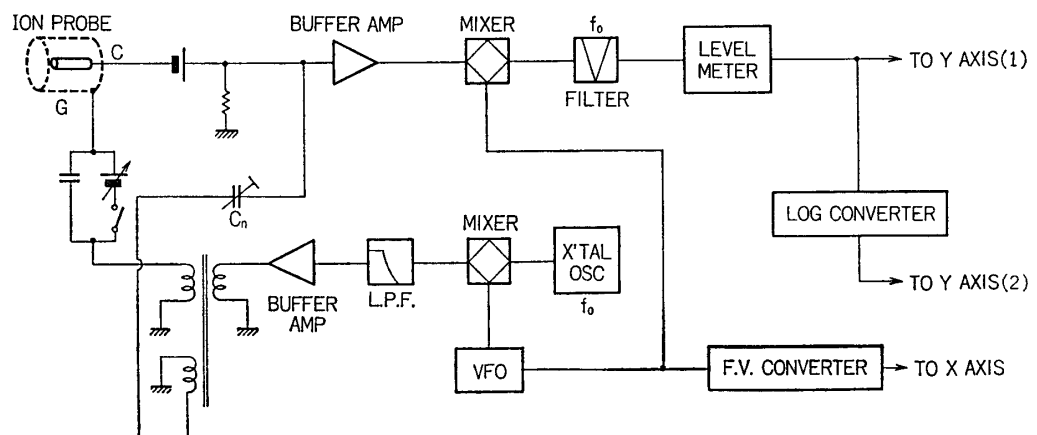
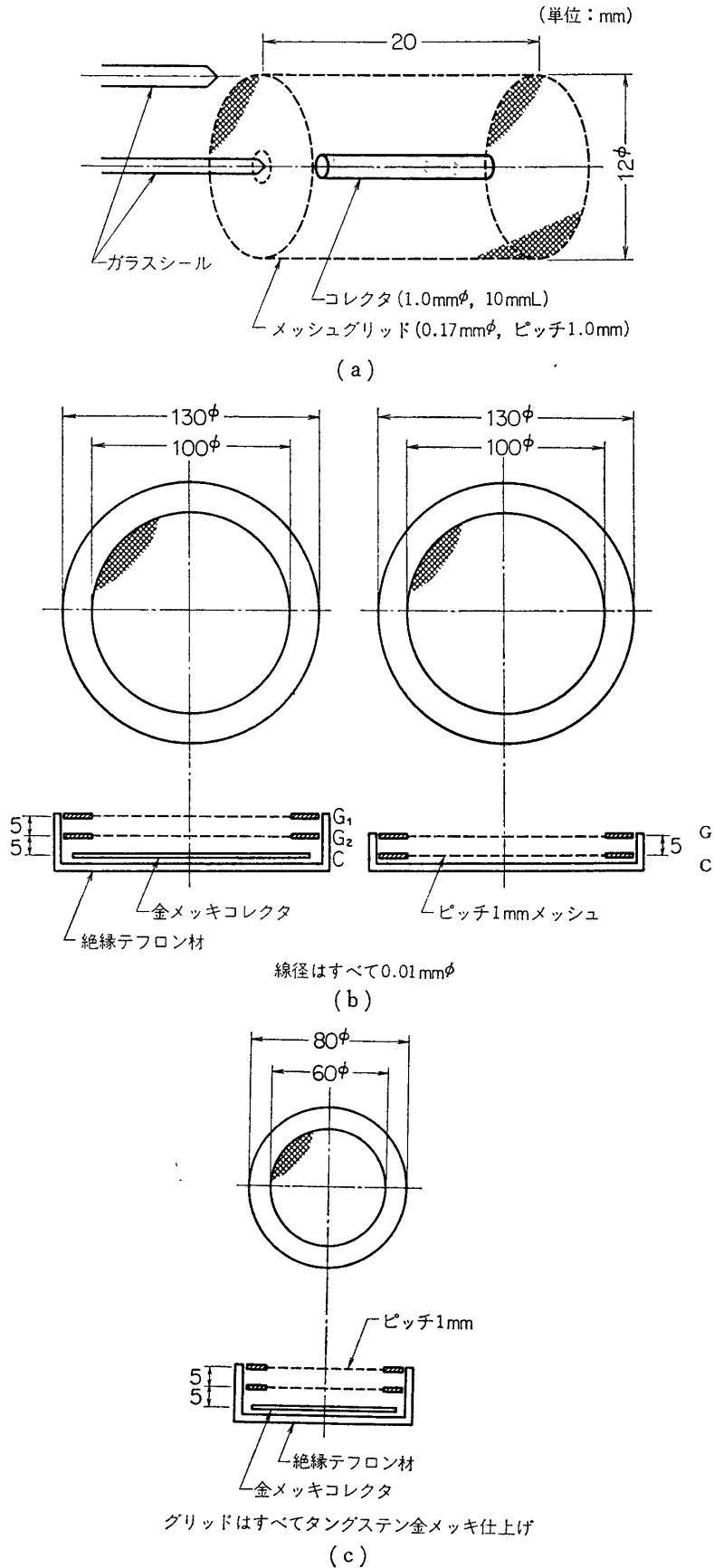


写真1



第4図 実験装置のブロック図



第5図 プロープ寸法

グリッドバイアス電圧はスイッチで切換えられ、フローティングポテンシャルにおくこともできる。また2枚のグリッドをもつプローブでは、第1グリッドは別に直流的にバイアスがかかけられ、外部プラズマを乱さないようにしている。

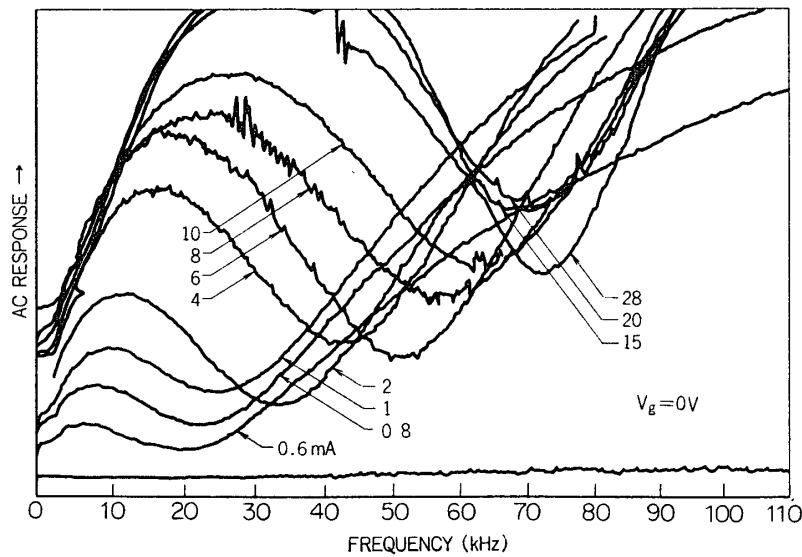
3. 実験結果

(A) 水銀放電管による実験

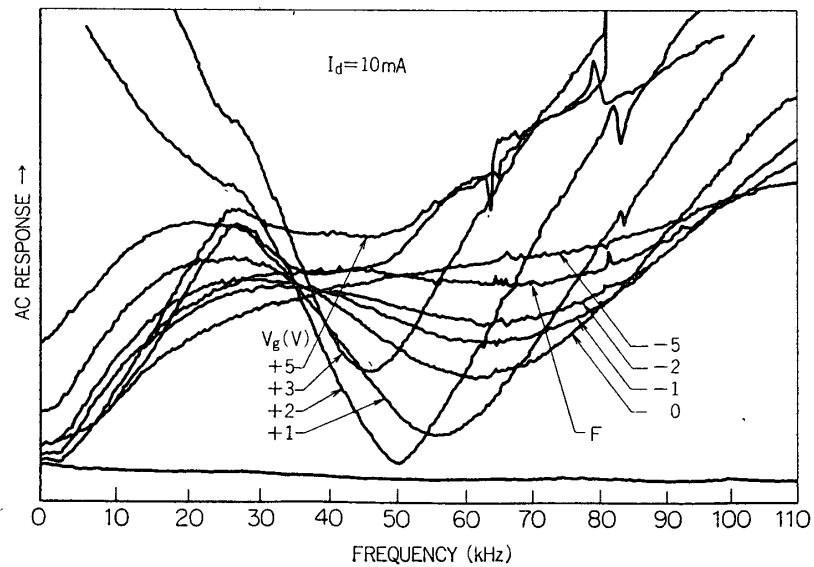
球状ガラス管内に約 10^{-3} torr の蒸気圧で封入された水銀グロー放電プラズマにより密度 $10^6 \sim 10^8$ 個/cc, 電子温度 $0.1 \sim 0.5$ eV の静かなプラズマを生成し実験が行なわれた。

この場合プローブは第5図(a)の円筒形を用いた。第6図は放電電流 I_d を変化させ、プラズマ密度を変えたときのコレクタ交流電流対グリッド掃引周波数特性の一例である。なおコレクタ直流バイアスを 0 V および正にした時には、単に静電容量結合にて単調増加するだけで何ら特徴的な変化を示さなかったが、負のバイアスのときのみ、プラズマ条件により大きく変化する特性が得られた。コレクタの交流レスポンスはイオンに関連することがわかる。以後の実験では V_c は -10 V にした。

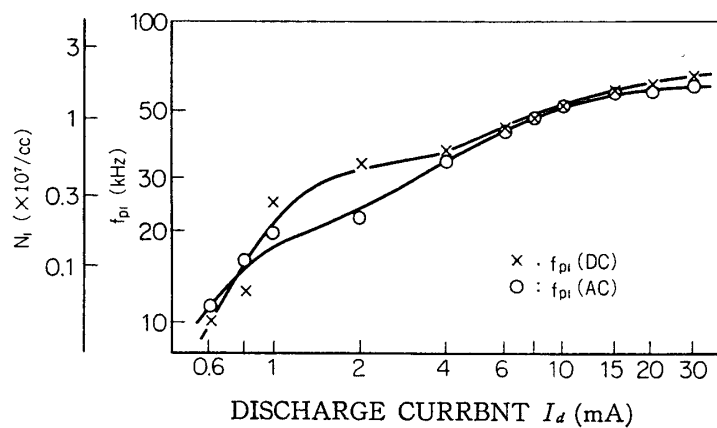
第7図は、放電電流を一定にして、プローブの V_g を変化させたときの特性である。この場合空間電位は 0.75 V であった。この結果から、 V_g が空間電位より高いときには、イオンが減速され、入射量が減る結果レゾナンス周波数は小さくなる。また V_g が空間電位より低いときには、その周波数はほとんど変化せず、ただ負になるほど共鳴の Q 値が低下してレゾナンスの決定がむつかしくなる。なお第6図および第7図でディップ点以外で急激なレベルの変化がところどころみられるが、これはプラズマ自体の低周波振動と考えられる。放電電流を変化させ、おのおののプラズマ条件におけるグリッドバイアスを常に空間電位においたときのディップ周波数をまとめ、同じくイオントラップ法で直流的にイオン密度を測定し



第6図 水銀放電管を用いたプローブの交流レゾナンス特性 (0.6 mA の下にあるはプラズマを切ったときの特性である)



第7図 放電電流 I_d が 10 mA のときのグリッドバイアス V_g による特性の変化, F はフローティングバイアスのとき



第8図 AC 法と DC 法の比較

た結果とを対比させると第8図が得られた。プローブ法の誤差の範囲を考えると先に述べた理論通り、このデップ周波数は、イオンプラズマ周波数とみなせる。

(B) スペースチェンバでの実験

比較的低密度で静かなプラズマをチェンバ内に後方拡散形プラズマ源により生成させて実験した。この場合真空度はさきの実験に比べ2けた近く良いため衝突周波数による影響が少ないと考えられる。プローブは写真3に示すようにチェンバのほぼ中央に設置され、可動棒に取りつけられ上下左右に移動できる。プラズマ源は写真にみられるとおりの軸上左右端に取りつけられている。中央にヘルムホルツコイルがあり、軸に平行な磁場をつくる。

第9図はヘリウムガスを用いて実験した結果の1例で、グリッドの直流バイアス V_g を変化させてレゾナンスの周波数の変化を測定した。なお、それぞれのバイアス点がイオントラップの静特性のどこに相当するかを合せて示した。水銀放電管の場合と同様、空間電位より



写真 2

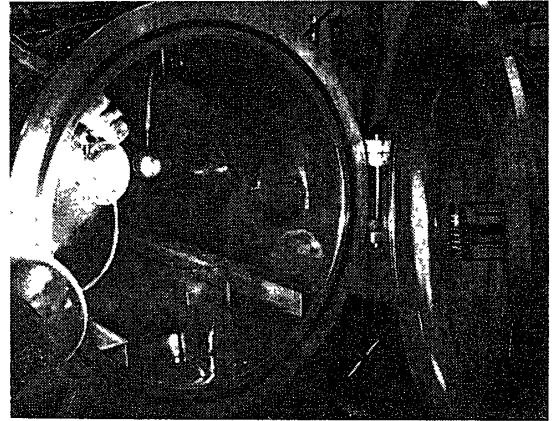
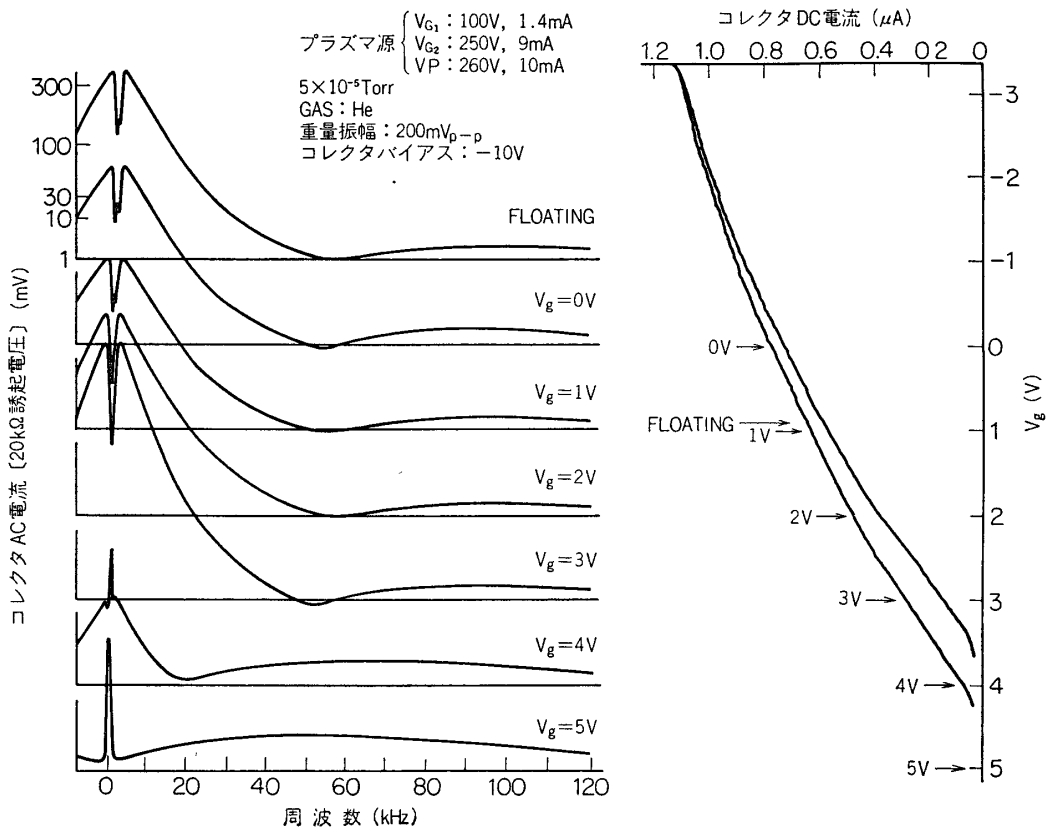


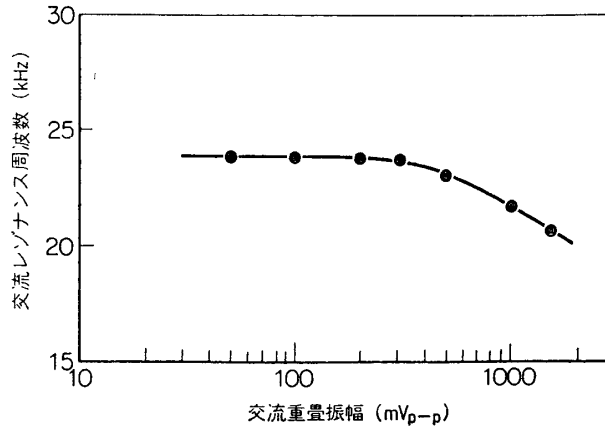
写真 3

チェンバーでの実験に使用したイオンプローブ

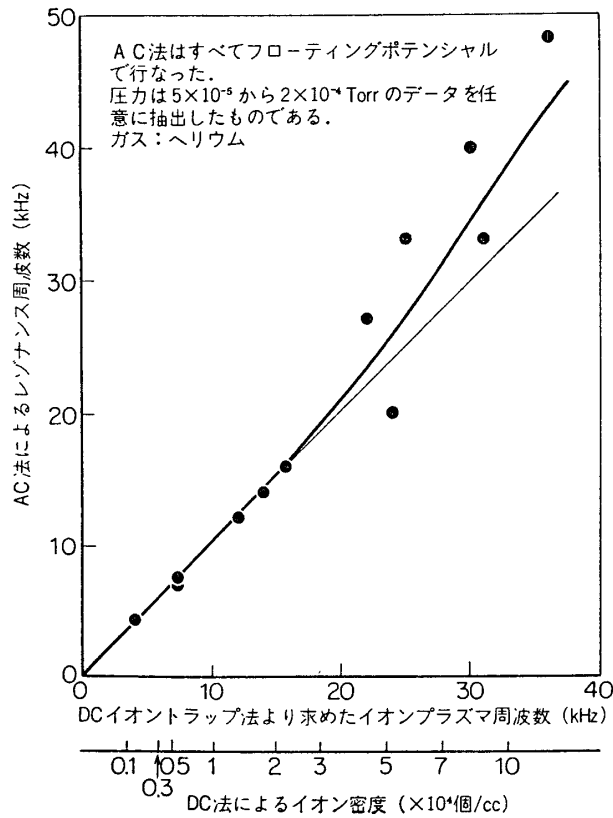


第 9 図 プローブグリッドバイアス変化によるレゾナンス周波数の変化と直流イオンラップ特性上で相当するバイアス点
イオンラップ特性には掃引のヒステリシスを生じている

負のバイアスであれば、レゾナンス周波数は変化しないことがはっきりと示された。なおこの最小値を示す周波数でコレクタ交流電流がインダクタンスからキャパシタンスに変わることをロックインアンプを用いて確認した。以後の実験では 1 枚グリッドとコレクタをもつブ



第 10 図 交流重畳振幅によるレゾナンス周波数の変化の 1 例



第 11 図 交流法と直流法の比較

ローブでは、 V_0 はフローティングバイアスでよいことがわかった。

グリッドに重畳する交流の振幅に対するレゾナンス周波数の変化の 1 例を示したのが第 10 図である。これより重畳振幅は 200 mV_{p-p} を使用して実験することにした。なお振幅が大きくなるとなぜレゾナンス周波数が低い方に移動するかは今後検討を要する。

第 11 図はプラズマの放電条件をかえて、密度変化に対し、本測定法と、イオントラップ

による直流法との結果を比較したものであり、気体はヘリウムを使用した。結果は、比較的低い密度では良く一致し、高い密度になるとデータがちらばっている。全体として DC 法より、AC レゾナンス法の方が高い値を示している。DC 法においては、イオン温度の決定が

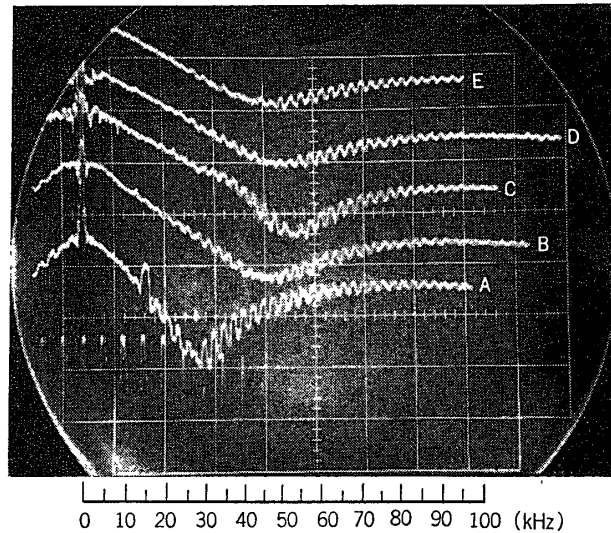


写真 4 プラズマ源からプローブをみる方向を正にとった磁場に対するレゾナンスの変化。プローブはプラズマ源に背をむけている。

A 外部磁場なし B 2.8 ガウス C 5.6 ガウス
D 11.2 ガウス E 16.8 ガウス

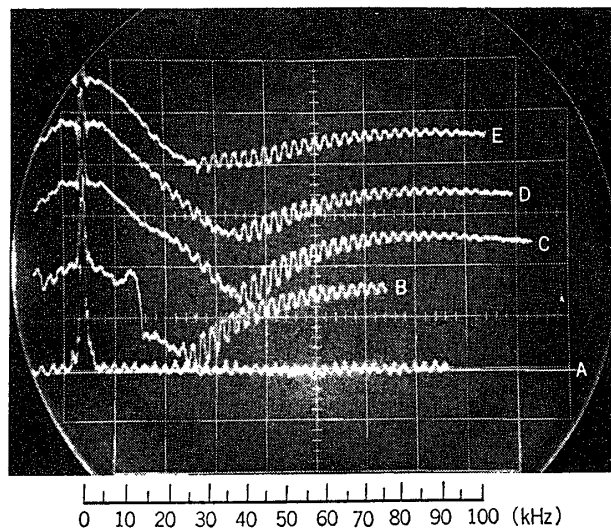


写真 5 A プラズマ OFF の時 B 外部磁場なし
C -5.6 ガウス D -11.2 ガウス
E -16.8 ガウス

写真 4, 5 のプラズマ源データ

V_{G1} 40 V 1.6 mA V_{G2} 100 V 6.3 mA

V_P 200 0.6 mA 7×10^{-5} torr

気体ヘリウム

プローブのヒステリシスの影響もあり困難なことや、透過率を100%にしていること、さらに直流法では非熱的イオンを測定できないこともあり、密度決定は誤差が大きいことを考えると良い一致をしていると考えられる。

写真4および5では磁場を印加したときの特性の変化を示した。プローブ面はこの場合磁場に直角方向に向き、しかもプラズマに背を向けた配置をしたときのデータである。磁場を印加するとある範囲まではレゾナンス周波数は増加しその後逆に減少する。しかし強い磁場中では放電条件自体がかわってしまうため、このデータのみではその特性を定量的に議論できない。なおイオンジャイロ共鳴周波数に特徴的なレスポンスの変化は検出されていない。外部磁場の小さいとき、水銀放電管での実験と同様のプラズマ振動が発生していることがわかる。

4. ま と め

新しいイオンパラメータ測定法を開発し、いくつかの実験条件において得られた結果を報告した。イオンの絶対組成、負イオンの検出、イオン温度の測定などプラズマ内イオンに関する測定法は今後開発されるべきものが多い。本実験法はいまだ十分理論的に各種プラズマ条件での特性がわかってはいないけれども、将来さらに実験と合せて研究する必要があると考えている。

5. 謝 辞

本測定法による実験を行なうにあたり暖かい御援助と御関心を賜った東京大学宇宙航空研究所伊藤富造助教授並びにスペースチェンバでの実験のご協力を頂いたチェンバ室小嶋学技官に厚く感謝致します。また、本研究について理論的にご検討を賜った京都大学大家寛助教授に謝意を表します。

1973年1月31日

なお本研究は1部宇宙研の観測ロケット特別事業の基礎開発研究およびスペースプラズマ共同利用研究として行なわれたものである。

参 考 文 献

- [1] T. Dote J. Phys. Soc. in Japan 24, 224, 1968
- [2] 大家, 大林 東大宇宙研報告 2 No 3 (B) 1066, 1966