

# 電極汚れの効果を低減させた正イオン温度測定器の開発\*

南 繁行\*\*・堤 四郎\*\*・竹屋芳夫\*\*

**Abstract:** The contamination effect to the d.c. probe in the plasma diagnostics is quite serious in the low density plasma. It causes the distortion or hysteresis curves on the probe characteristics. In order to escape it, for the Langmuir probe measurements, methods of high speed sweeping of probe voltage and using the cleaned probe are reported.

In this paper, we dealt with the results of experimental examinations of the possibilities and the limitation of the application of above sweeping to the ion temperature measurement. The essential difficulties of the ion temperature measurements to the d.c. probe of the electrons that very small signal currents and the strong capacitance of the electrodes makes the large time constant, is solved by the use of the neutralization circuits.

By this neutralization, high speed voltage sweeping can be possible, and high time resolution of the parameters can be obtained. Using this merits, when the probe is boarded on the space craft, this high space resolution of this probe has additive merits about the possibilities of the aspect measurements of plasma flow and the probe. It is concluded that the high scan rate ion trap is useful of the space craft to the erroneous probing by the use of uncleaned probe.

## 内 容 梗 概

低密度プラズマにおいて、直流プローブによるプローブ特性を得る際に電極汚れが原因となる特性の歪がしばしば問題となる。この解決法としてすでにラングミュアプローブ法では電圧の高速掃引とガラス封じによるプローブの清浄保持がなされている。著者らは、高速掃引法を正イオン温度測定用イオントラップに適用し、その使用範囲を実験的に確めた。比較的微小な信号電流と電極のストレー容量のためにおきるレスポンスの遅れを、電子回路的に中和することで解決した。また、このプローブをロケットなど飛翔体に搭載してプラズマとの相対速度を逆に利用してイオン成分ごとの測定を行う。いわゆる遅延ポテンシャルトラップ (Retarding Potential Analyzer) として使用する際の本測定法の高い分解能を持つ利点について考察する。

---

\* 宇宙研特別事業費による研究

\*\* 大阪市大工学部

## 1. ま え が き

プラズマ中でのラングミュアプローブ特性における歪の主たるものは、プローブ表面の付着物とされている [1], [2]. これらは、第1表のようにまとめることができる. 特に、ロケットなど飛翔体搭載用のプローブは、打上げ時までその清浄さを保つことが困難であるため、これが測定誤差に及ぼす要因となってきた. 誤差となる大きなものは、特性に及ぼすヒステリシスであり、これは表面汚れのもつ誘電体の緩和時間と電圧掃引速度が関連して生ずる. この歪を除去する方法にはつぎの二つがある. 一つは、緩和時間よりも十分はやい電圧掃引を行って誘電体汚れの持つインピーダンスを短絡してしまおうとする方法 [2] である. この結果ヒステリシスの消滅が確かめられ、精度の高い電子温度測定に有効であることが報告されている. もう一つの方法は、電極のガラス封じによるクリーン化であり、ガラスカッターによる操作がロケットによる歪のないラングミュア特性取得を可能にした [3].

同じように、メッシュグリッドを持つイオントラップ (Retarding Potential Analyzer R. P. T.) を用いたイオン温度測定についてもプローブ特性の歪の発生を抑えることは、プローブの清浄さ保持の面で、なかなか困難であった. 例えば、著者らが実験した S 310-4 号機搭載の R. P. T. においては、発射直前まで乾燥ガスをプローブに封入する方法を用いて品質管理を行った. 本論文では、このような汚染を化学的に避けるのではなく、信号処理を含むプローブ測定系の改良により、電極汚染があっても特性に歪が生じないように考察した方法について、実験した結果について述べる. これは電子温度測定のための高速掃引ラングミュアプローブの手法を適用したもので、この手法のもたらす高い時間分解能は、ロケットなど飛翔体によるイオン温度測定において、新たな長所も得られることが示される.

## 2. 交流掃引による R. P. T.

グリッドを持つ R. P. T. においてもラングミュアプローブと同様に高速の電圧掃引を行えばヒステリシスが消滅することが期待できるが、イオン温度測定に関しては電子の測定ほどこれは容易ではない. 理由は、イオン電流の捕集を行うために、プローブからみたプラズマの等価インピーダンスがきわめて高いためである. この点電子回路的処理を必要とする.

R. P. T. 測定法には二つの方法がある [4]. すなわち、グリッドで電圧掃引を行って負バ

第1表 プローブ特性に及ぼす歪の因子

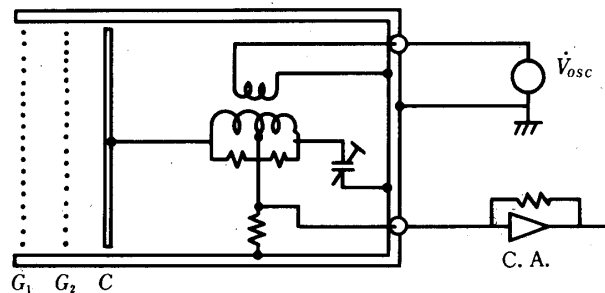
現 象	原 因
プローブ電圧の不均一性	表面仕事関数の不一樣
表面での電圧降下による歪	付着物の抵抗分
ヒステリシス特性 (極性効果)	付着物の誘電体緩和時間
擬似電流	スパッタ及び電子放出
位相ひずみ	回路系のストレー及び位相遅れ

イアスされたコレクターでイオン電流を捕集する方法（グリッド掃引）と、グリッドには適当なサプレッサ電圧を印加して電子を反発させ、コレクタにて電圧掃引を行いコレクタ電流を検出する方法（コレクタ掃引）がある。この両者には一長一短がある。プローブ特性の正確さから言えば、グリッド電圧はメッシュを用いるために不均一さを避けられないが[1]、この不確定さがない点コレクタ掃引が優れている。信号処理の点からは、グリッド電圧、コレクタ電流各々をシングルエンドで扱うグリッド掃引法が有利である。しかし、グリッドが正バイアスされるためにおこるグリッドでの電子捕集がグリッド表面での汚れに直接影響を与え、ヒステリシスの原因をつくる。これに対し、コレクタ電圧を掃引する場合、電子は流入しないため、コレクタ電極における汚れによる電圧降下が少なく、本質的に同じ掃引速度であればコレクタ掃引の方がヒステリシスは少ない[4]。ただし、信号処理上からは電圧掃引と電流増幅のいずれかを平衡形で扱う点が難しくなる。我々は、第1図に示すように、掃引電圧  $V_{osc}$  をトランスを介して結合させる方法を用いた。この方法により、直流分も含めてコレクタ電流を検出することができる。さらに、トリマコンデンサ  $C_0'$  は主としてグリッドコレクタ間で生ずるストレー容量  $C_0$ （約10 pF）を補償するために設けたものであり、トランスを含む回路部品はコレクタの近傍に取り付けられている。第1グリッドはフローティング電位に、第2グリッドは適当な負の電位（-2~-10V）におく。

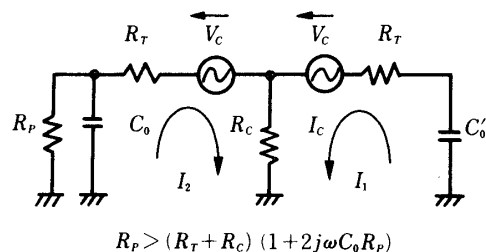
$V_{osc}$  の電圧はトランスを介して  $V_c$  なる電圧を生じるが、この周波数が高くなると、通常はきわめて高いプラズマ等価抵抗  $R_p$  と浮遊容量  $C_0$  のために、大きな位相差が生じる。第2図はこの温定法の等価回路を示したもので、 $R_T$  はトランスの出力インピーダンスを示す。 $R_c$  はコレクタ抵抗である。 $V_c$  を二つ示してあるのは、トランスの midpoint に対して同相電圧が二つあると考えることによる。さて、 $V_c$  による掃引の結果、コレクタ電流  $I_c$  がどうなるかを求める。ここで

$$C_0' = C_0 \quad (1)$$

の条件が満たされるとする。これは実際には  $R_p$  が無限大となる真空中において、 $R_c$  に生じる電圧がゼロとなるよう  $C_0'$  の調整を行うことを意味する。いま第2図の回路網に流れる電流を  $I_1$ ,  $I_2$  とすると、



第1図 高速スキャンR.P.T.の模式図



第2図 高速スキャンR.P.T.の等価回路

$$I_1 = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} V_C & R_C \\ -V_C & \frac{1}{sC_0} \parallel R_P + R_T + R_C \end{vmatrix} \quad (2)$$

$$I_2 = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} \frac{1}{sC_0} + R_T + R_C & V_C \\ R_C & -V_C \end{vmatrix} \quad (3)$$

となる。ここで  $s$  はヘビサイド演算子である。また

$$\Delta = \begin{vmatrix} \frac{1}{sC_0} + R_T + R_C & R_C \\ R_C & \frac{R_P}{1 + sC_0 R_P} + R_T + R_C \end{vmatrix} \quad (4)$$

である。  
いま

$$sC_0 R_P = j\omega C_0 R_P \gg 1 \quad (5)$$

とする。コレクタ電流  $I_C$  は、

$$\begin{aligned} I_C &= I_1 + I_2 \\ &= \frac{V_C}{\Delta} \left( \frac{R_P}{1 + sC_0 R_P} - \frac{1}{sC_0} \right) \\ &= \frac{V_C}{\Delta} \cdot \frac{-1}{R_P + (1 + 2sC_0 R_P)(R_T + R_C) + sC_0 R_T (R_T + 2R_C)} \end{aligned}$$

$$= \frac{-V_c}{R_P + sC_o R_P \{ 2(R_T + R_C) + sC_o R_T (R_T + 2R_C) \}} \quad (6)$$

となる。すなわち

$$I_c = \frac{V_c}{R_P} \quad (7)$$

となる無歪条件は、

$$1 \gg 2(R_T + R_C) sC_o \quad (8)$$

である。いま補償コンデンサ  $C_o'$  を用いない場合は、

$$\tau_1 = 2\pi C_o R_P = \frac{1}{f_1} \quad (9)$$

で制限された掃引周波数  $f_1$  が、この回路構成により、

$$\tau_2 = 2\pi C_o (R_T + R_C) = \frac{1}{f_2} \quad (10)$$

となる。例えば、プラズマ等価抵抗  $R_P$  を  $10^8$  [ $\Omega$ ]、 $C_o$  を 10 [pF] とした時、

$$\tau_P = 10^{-2} \text{ [sec]}, \quad f_1 = 100 \text{ [Hz]} \quad (11)$$

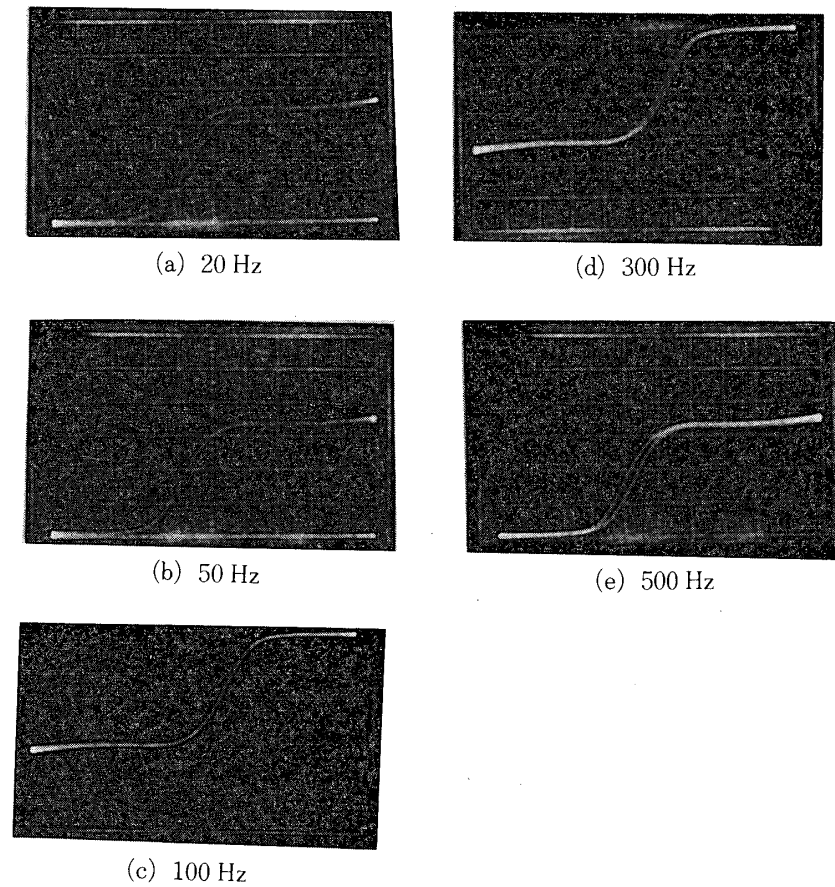
となる。この  $f_1$  は位相にして  $45^\circ$  もずれる周波数であり、現実に数度以内におさまるには使用周波数は 5~10 [Hz] に制限される。いま 600 [ $\Omega$ ] のトランスを用いると  $R_T$  は 300 [ $\Omega$ ] になる。ここで問題になるのは、コレクタ検出抵抗  $R_C$  である。単なる電圧降下による抵抗端検出法によると、例えば  $R_C$  は 100 [k $\Omega$ ] 以上にならざるを得ないが、カレントアンプを OP アンプで構成すれば等価入力抵抗をゼロにすることができるため

$$\tau_n = 10^{-7} \text{ [sec]}, \quad f_2 = 10 \text{ [MHz]} \quad (12)$$

とすることができる。制限周波数はこの 100 分の 1 として 100 [kHz] になる。第 10 高調波まで含む入力信号とすれば掃引周波数として 10 [kHz] まで可能ということがわかる。あとは結合トランスの帯域とアンプの問題となる。このように高い周波数まで浮遊容量の影響があらわれないために、後述のような新しい利点も生まれてくる。

### 3. 実験結果

この高速スキャンの R.P.T. を用いてその特性を調べた結果について述べる。第 3 図はプラズマ密度  $4 \times 10^5$  [1/cc] のアルゴンプラズマ中で掃引周波数を変えた時得られたプローブ特性の例である。図中横軸は交流掃引電圧で正弦波を用いた。縦軸はカレントアンプの出力を示している。図から明らかなように、500 [Hz] の掃引周波数で多少の位相歪があら

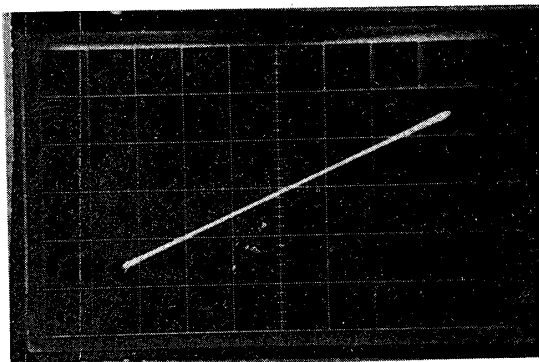


第3図 掃引周波数を変化させた時のイオン電流の特性  
(よこ軸 0.15 V/div, たて軸  $10^{-8}$  A/div)

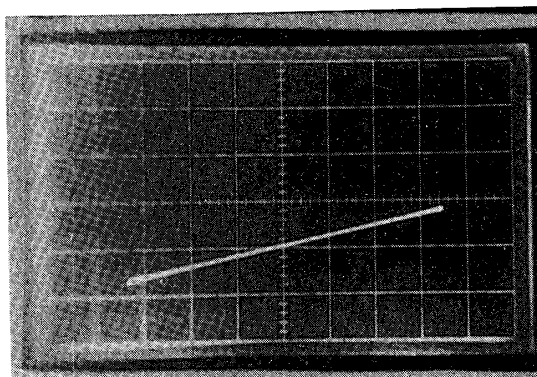
われているが、それ以下の周波数ではヒステリシスが消滅している。例えば、300 [Hz] の掃引では歪がほとんどないことから、その第10高調波である3 [kHz] 付近まではこの測定系は平坦であることを示している。1 [kHz] 以上での歪はカレントアンプの位相おくれが原因であり、プラズマは十分応答していると考えてよい。ちなみに、イオンプラズマ周波数  $f_{pi}$  は21 [kHz] であった。

つぎに、第2図の回路においてプラズマのかわりに模擬抵抗  $R_p$  を用いて測定系の特性を調べた。  $C_o$  としては20 [pF] を用いた。第4図 (a) はカレントアンプを用い、  $R_c$  がゼロの状態では  $R_p$  を変えたもので、130 [Hz] においていずれも全く位相歪のない事がわかった。つぎに、  $R_c$  として100 [k $\Omega$ ] を用い、電圧降下法で  $I_c$  を測定すると、第4図 (b) のようにヒステリシスがあらわれた。比較的低い周波数で歪があらわれたのは、トランスの1次側と2次側との容量結合による誘起電圧が  $R_c$  に生じたためと考えられる。このことは、例えば  $R_p$  に直列に点接触ダイオードを入れて電流を実際のプラズマイオン電流特性に近い形に歪ませた時、一層顕著になった。第5図の上図は帰還抵抗1 [M $\Omega$ ] のカレントアンプを

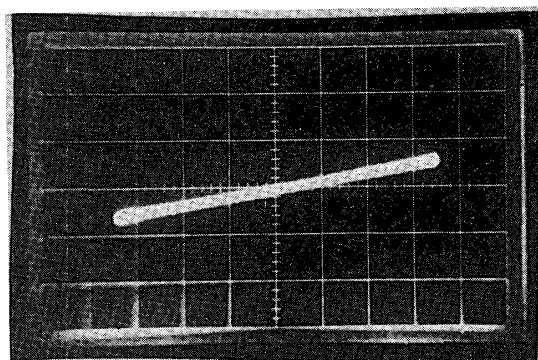
$R_c=0$



$R_p=1\text{ M}\Omega$   
(V :  $5 \times 10^{-7}$  A/d)



$R_p=20\text{ M}\Omega$   
(V :  $5 \times 10^{-8}$  A/d)

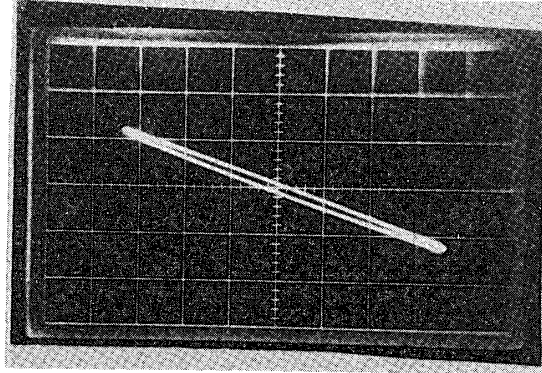


$R_p=100\text{ M}\Omega$   
(V :  $5 \times 10^{-9}$  A/d)

(f = 130 Hz)  
(H : 1 V/d)

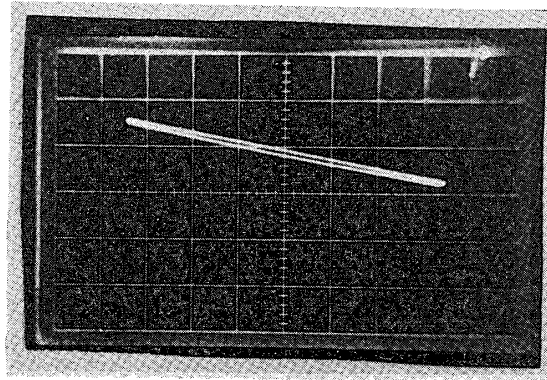
第4図 (a) 等価抵抗  $R_p$  による特性の変化

$$R_c = 100 \text{ k}\Omega$$



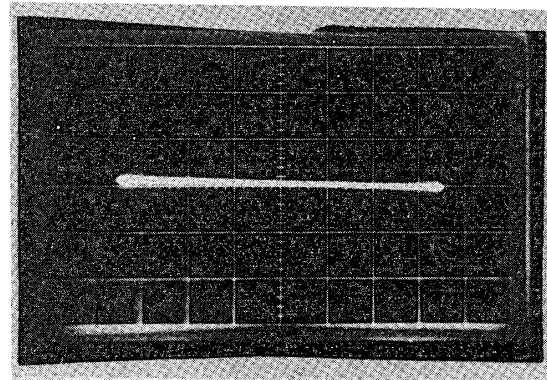
$$R_p = 1 \text{ M}\Omega$$

$$(V : 5 \times 10^{-7} \text{ A/d})$$



$$R_p = 20 \text{ M}\Omega$$

$$(V : 5 \times 10^{-8} \text{ A/d})$$



$$R_p = 100 \text{ M}\Omega$$

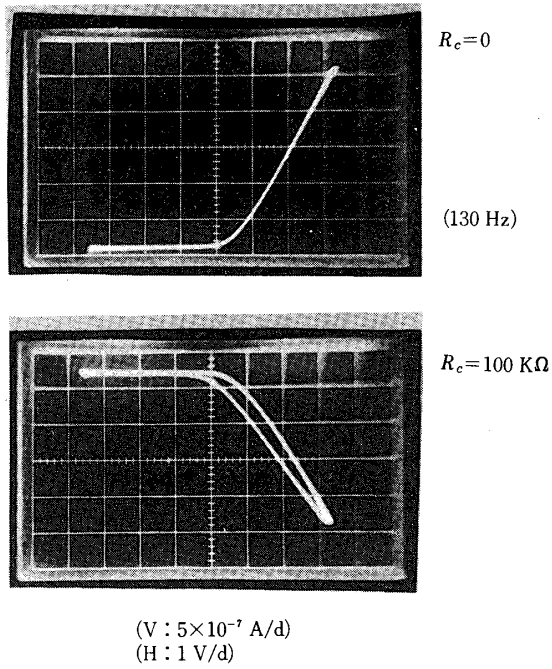
$$(V : 5 \times 10^{-8} \text{ A/d})$$

$$(f = 130 \text{ Hz})$$

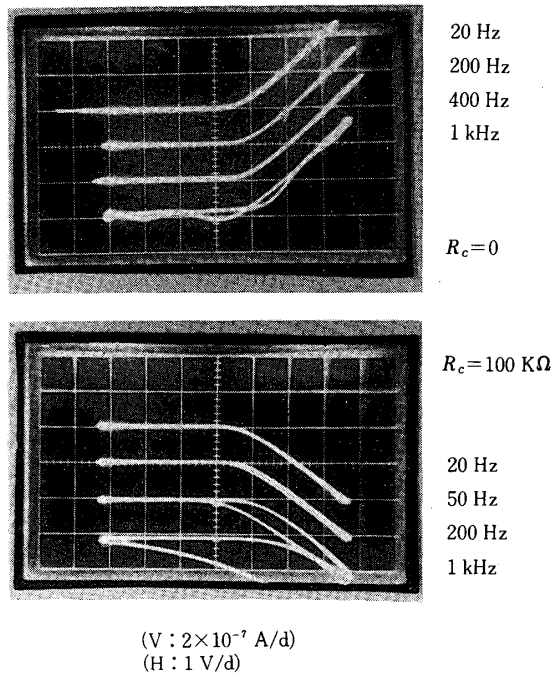
$$(V : 1 \text{ V/d})$$

第4図 (b) 等価抵抗  $R_p$  による特性の変化





第5図 RCによる特性のちがいの例



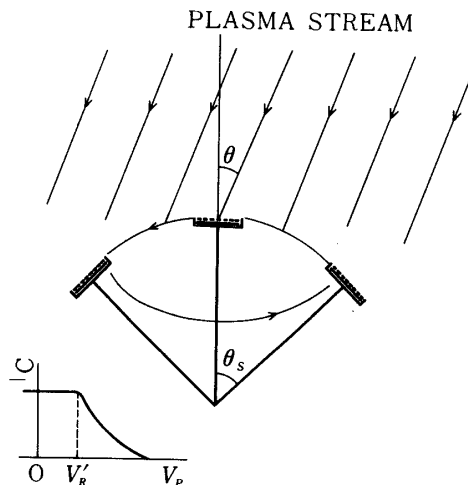
第6図 特性の周波数依存性の例

用いた場合であり、下図の  $100 \text{ [k}\Omega\text{]}$  による電圧降下法に比し歪の起きないことが確かめられた。上下で極性が反対なのはアンプを用いたためである。つぎに、カレントアンプを用いた時と  $R_c$  を  $100 \text{ [k}\Omega\text{]}$  にした時で周波数に対する特性が異なることが第6図のように確かめられた。図中上には、 $1 \text{ [kHz]}$  においてトランスのリングングとみられる振動があらわれているだけだが、下図の電圧降下法ではすでに  $50 \text{ [Hz]}$  で位相のおくれによる歪がみられる。従って、高速スキャンの R.P.T. では第3図のような補償コンデンサを用いて浮遊容量をバランスさせた状態でカレントアンプにより信号を検出すれば、我々の目的としているよごれによる直列インピーダンスとそのヒステリシス効果の影響の除去が十分達成できることがわかった。低レベルのしかも高いインピーダンスの信号に関しては、入力信号との容量結合をいかに避けるかが解決の糸口となる。

#### 4. 飛翔体搭載用としての考察

実際の飛翔体搭載用としては、I.R.I.G. の FM テレメータのレスポンスの点からせいぜい  $30\sim 50 \text{ [Hz]}$  での掃引という事になるが、それにしても高速での掃引でプラズマ中の R.P.T. 特性が得られることになると、単に多くのデータが得られるというばかりでなく R.P.T. での測定に特有の問題についての解決にも寄与できる。その一つはロケット速度とイオンの熱速度との相対効果としてプローブ特性が変化することであり、多成分イオンにおいては後述の基準電位が変化するという問題である。第7図において、左下図は平板型 R.P.T. の特性の模式図を示している。ここで、横軸は掃引電圧  $V_p$ 、縦軸はコレクタ電流  $I_c$  である。

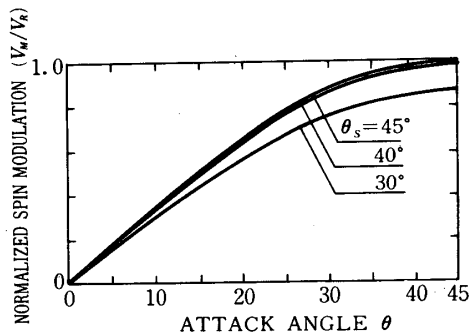
ロケット速度  $v_R \text{ [km/s]}$  のために、イオン減速のはじまる電圧  $V_R'$  は



第7図 アタックアングルを得るための方法

$$V_R' = \frac{M_i}{2e} v_R^2 / \cos^2 \theta \quad (13)$$

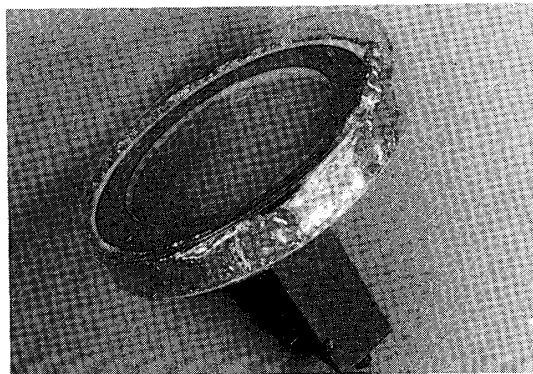
だけ変化する。ここで、 $M_i$  はイオン質量、 $\theta$  はプローブ法線とプラズマ流のなす角（ロケット速度ベクトルと中心軸のなす角：アタックアングル）である。基準電位の決定および質量決定のためにも  $\theta$  の測定は必要である。またプリセッションのあった場合、簡単に姿勢を決定できないのが現状である。そこで、いま高速スキャンの R.P.T. を角度  $\theta_s$  だけスピン軸より傾けてセットすると、プローブは  $\theta_s$  を中心として法線角度が  $\theta_s \pm \theta$  だけ変化する。それに伴い  $V_R'$  は変化する。ロケットのスピン周期約 1~0.3 秒の間に、例えば 30 [Hz] の掃引をすれば、60 個の  $V_R'$  が求まる。第 8 図はこの  $V_R'$  の最大値と最小値の電圧差、すなわち変調電圧  $V_M$  をロケット速度から式 (13) により計算される  $V_R$  で正規化した値とアタ



$$V_M = V_R [\cos^2(\theta_s - \theta) - \cos^2(\theta_s + \theta)]$$

$$\theta_s = 45^\circ$$

第 8 図 アタックアングルと変調電圧との関係を示す図



第 9 図 プローブの写真

ックアングル  $\theta$  の関係を  $\theta_s$  をパラメータとして示したものである。  $\theta_s$  が  $45^\circ$  の時、  $\theta$  として  $45^\circ$  までを算出できる。 なお、  $V_M$  はつぎの式で求まる。

$$V_M = V_R [\cos^2(\theta_s - \theta) - \cos^2 \theta(\theta_s + \theta)] \quad (15)$$

ロケットの軸方向に別の高速 R. P. T. をセットする事により質のよいイオン温度のデータを得ることができる。

第9図に実験に用いた R. P. T. を示す。このプローブのグリッドは200メッシュタングステン金メッキのものを用いた。実効直径は100 mm である。また写真にはガラス封止用のふたを取付けた状態を示している。この方法は、ここに述べた回路的手段を用いることなく、比較的掃引回数の少ない(1~3回/sec)時に使用でき表面汚れの影響を解決できる。

### 5. ま と め

下部電離層の熱収支を知る上でロケットによるイオン温度の測定は重要な項目であるが、通常何の処理もしない状態で R. P. T. の測定を行うと大きなヒステリシスが生じ信頼性の高いデータが得られなかった。ここで紹介した高速スキャン R. P. T. 法はこの電極汚れによる歪を除去した測定ができるほか、高速掃引による高い空間分解能の達成、さらに R. P. T. のもつ不確定要素であるアタックアングルの情報も同時に得ることが期待される。特に電極汚れの影響が大きいロケット上での観測に効果を発揮するものと思われる。

1978年12月2日

### 参 考 文 献

- [1] R. F. Kemp, et al; Rev. Scien. Instr. **37** (4) 455 (1966)
- [2] K. Hirao, et al; Space Res. X (1972)
- [3] 小山ほか, 東大宇宙研報告 11-1(A) 35
- [4] 南ほか, スペースプラズマ研究会 1974年 p. 1
- [5] K. Oyama, I. S. A. S. Report 525 (1975)