

# 電離層測定プローブ (II)\*

— 球形 Retarding Potential Trap —

宮崎 茂\*\*・森 弘隆\*\*

## Ionospheric Measuring Probe

By

Shigeru MIYAZAKI and Hirotaka MORI

**Abstract:** Basic ionospheric parameters such as the electron density, the electron temperature, the ion density, the ion temperature, mixing ratio and etc., have been measured by individual probe systems with sounding rockets and satellites till now. However, it is preferable that all the ionospheric parameters are measured at the same time by a single probe assembly especially in the case of exact comparison between the parameters or in the case of the measurement of ionosphere where many kinds of ions exist simultaneously.

In this paper, the method by which the electron density, the electron temperature, the ion density, the ion composition, the ion temperature and the plasma space potential relative to the vehicle potential are measured by means of spherical probe assembly is described. That is, this measuring method is suggested in order to obtain all the ionospheric parameters self-consistently and accurately.

### 概 要

従来電離層プラズマ諸量の測定はおのおの別々の電極を用いて行なわれてきたが、プラズマ諸量の精密な相互比較をする場合とか、複数の種類のイオンが存在する場合などにおいては単一電極系を用いて同時測定を行なう必要がある。この論文では球形トラップ方式の電極で電離層プラズマ諸量を同時にかつ self-consistent に測定する方法を考察した。

### 1. 緒 言

電離層の諸量の self-consistent な測定法の開発の重要性については前回の報告 [1] で述べたとおりである。今回取り扱う球形プローブは、その幾何学的形状から空間に対して方向性を示さないという大きな特徴を備えており、前回扱った平面プローブとは対称的である。測定技術の上で、平面プローブの場合にプローブ方向の飛しょう体の分速度が正確にわかっているなければならないという短所が、球形プローブでは本質的に除かれている。

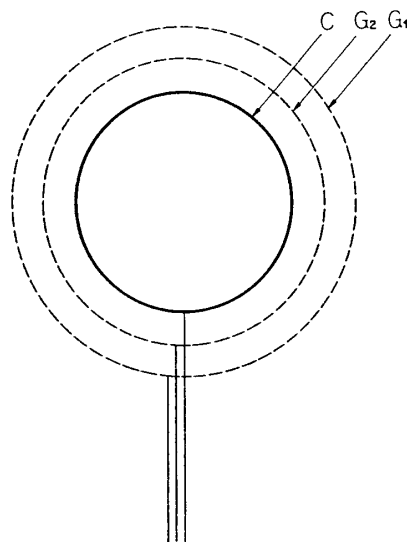
---

\* この研究は一部観測ロケット特別事業の基礎開発研究費によって行なわれたものである。

\*\* 郵政省電波研究所

### 2. 測定電極

球形測定電極の構造は第 1 図に示すように、二つのグリッド  $G_1, G_2$  とコレクター  $C$  の三つの電極からなる。各電極の機能を述べると、グリッド  $G_1$  には負から正に掃引する可変電圧を印加し、トラップに流入する電子およびイオンの量を制御する。次にグリッド  $G_2$  には、コレクター  $C$  からの二次電子放射を防ぐために  $C$  に対してかなり大きな負の電圧を印加する。コレクター  $C$  には一定の負電圧を印加して  $G_1$  を通過したイオンだけを捕集する。 $G_1$  の電流電圧特性はイオン電流が小さいので主として電子の電流電圧特性と考えられる。したがって  $G_1$  の特性曲線から電子に関する量すなわち電子密度、電子温度および空間電位が決定できる。またコレクター  $C$  のイオン電流電圧特性からイオンに関する量すなわちイオン密度、イオン温度、イオン混合比などが決定できる。



第 1 図 プローブ系

### 3. 測定原理

#### 3-1 イオン密度, イオン混合比, イオン温度

第 1, 2 表に示すごとく、イオンに関する諸量を測定する場合、イオンの平均熱運動速度に比べて飛しょう体の速度は無視できないので、飛しょう体の電離層プラズマに対する相対運動を考慮しなければならない。

第 1 表 イオンおよび電子の最大確率速度 (km/sec)

$M^+/T(^{\circ}K)$	500	1000	2000	3000	4000
1	2.87	4.06	5.74	7.04	8.12
4	1.44	2.03	2.87	3.52	4.06
16	0.72	1.02	1.44	1.76	2.03
30	0.52	0.74	1.05	1.28	1.48
Electron	123.	174.	246.	302.	348.

第 2 表 ロケットおよび人工衛星の飛しょう速度

飛しょう体	速度範囲 (km/sec)	備考
Kappa ロケット	1.5 ~ 3.	東大宇航研
Lambda ロケット	1.8 ~ 4.5	東大宇航研
円軌道 1000 km	7.357	Alouette I
楕円軌道 500~3000 km	6.001 ~ 8.185	Alouette II
楕円軌道 250~2000 km	6.487 ~ 8.103	(SRATS)

飛しょう体の速度を  $u_0$  とすると、プローブに電圧  $V$  (Retarding potential) を印加したときのイオン電流式は G. Medicus [2] によって次のように与えられている。〔付録 1〕

$$j_i(V) = \sqrt{\pi} e N_i r_p^2 v_p \left[ \varepsilon^{-\alpha^2 - \alpha_0^2} \left\{ \frac{\alpha}{\alpha_0} \sinh(2\alpha\alpha_0) + \cosh(2\alpha\alpha_0) \right\} + \frac{1}{\alpha_0} \left( \frac{1}{2} + \alpha_0^2 - \alpha^2 \right) E(\alpha - \alpha_0, \alpha + \alpha_0) \right] \quad (1)$$

減速電界

ここで、 $v_p = \sqrt{\frac{2kT_i}{M_i}}$ : イオン最大確率速度

$$\alpha_0 = \frac{u_0}{v_p} \quad \alpha = \sqrt{\frac{2eV}{M_i v_p^2}} = \sqrt{\frac{eV}{kT_i}}$$

$$E(a, b) = \int_a^b \varepsilon^{-x^2} dx \quad \varepsilon: \text{自然対数の底}$$

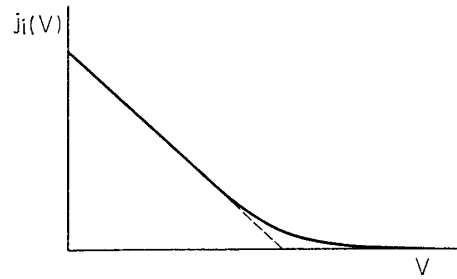
$j_i$ : イオン電流                       $r_p$ : プローブ半径  
 $N_i$ : イオン密度                       $e$ : 電子電荷  
 $T_i$ : イオン温度                       $k$ : ボルツマン定数  
 $M_i$ : イオン質量                       $V$ : プローブ印加電圧

(1)式の概略は一般的には第2図のようになる。同図において電圧の低い部分の直線部は相対速度の効果を示し、その先の曲線部はイオンの熱運動速度の効果を示している。

さらに、(1)式の電圧微分を計算すると、次のようになる。

$$\frac{dj_i}{dV} = -\frac{\sqrt{\pi} e^2 N_i r_p^2 v_p}{kT_i \alpha_0} E(\alpha - \alpha_0, \alpha + \alpha_0)$$

(2)

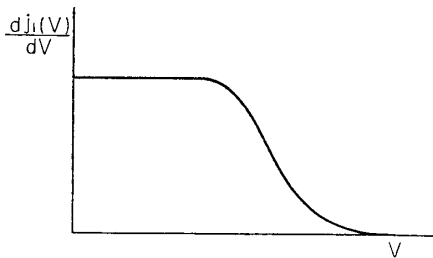


第2図 イオン電流-電圧特性

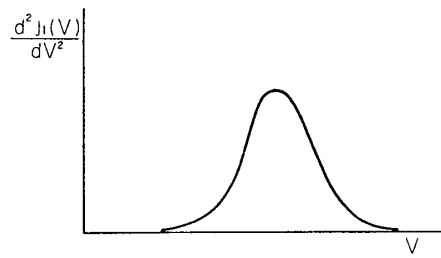
$$\frac{d^2 j_i}{dV^2} = \frac{\sqrt{\pi} e^3 N_i r_p^2 v_p}{k^2 T_i^2 \alpha_0} \varepsilon^{-\alpha^2 - \alpha_0^2} \sinh(2\alpha\alpha_0) \quad (3)$$

(1)式と同様に、(2)、(3)式の概略は第3図および第4図に示すとくなる。

上述の(2)、(3)式において、 $V = M_i u_0^2 / 2e$  すなわち  $\alpha = \alpha_0$  のとき、 $\alpha_0 > 1$  の場合には次のような近似が行なえる。



第3図 微分イオン電流-電圧特性



第4図 二次微分イオン電流-電圧特性

$$\frac{dj_i}{dV} = -\frac{\sqrt{\pi} e^2 N_i r_p^2 v_p}{k T_i \alpha_0} E(0, 2\alpha_0) \approx -\frac{\pi e^2 r_p^2 N_i}{M_i u_0}$$

$$\frac{d^2 j_i}{dV^2} = \frac{\sqrt{\pi} e^3 N_i r_p^2 v_p}{k^2 T_i^2 \alpha_0^2} \varepsilon^{-2\alpha_0^2} \sinh(2\alpha_0^2) \approx \frac{2V\sqrt{\pi} e^3 r_p^2 N_i}{M_i u_0^2 V 2M_i k T_i}$$

この近似が成り立つ範囲では、 $\alpha = \alpha_0$  のとき、 $dj_i/dV$  はイオン密度  $N_i$  に比例し、イオン温度  $T_i$  に依存しない。また、 $d^2 j_i/dV^2$  は  $N_i/\sqrt{T_i}$  に比例することがわかる。

### 3-2 電子密度、電子温度、空間電位

第 1, 2 表に示すごとく、飛しょう体の運動速度に比して電子の平均熱運動速度は非常に大きいので飛しょう体の運動速度は無視できる。したがって、電子に関する諸量を測定する場合は従来の静止プラズマの解析法をそのまま用いることができる。

### 4. 測定法および解析

プローブの電流電圧特性からイオン電流  $j_i$ 、微分イオン電流  $dj_i/dV$ 、二次微分イオン電流  $d^2 j_i/dV^2$  を求める方法を述べる。プローブの第一グリッド  $G_1$  に微小振幅の交流電圧を重畳したきょ歯状直流電圧を印加すると、捕集される電流  $j$  は次のように表わされる。

$$j = f(V + a \sin \omega t) \quad a: \text{微小振幅}$$

$$= f(V) + \frac{a^2}{4} f''(V) + \dots$$

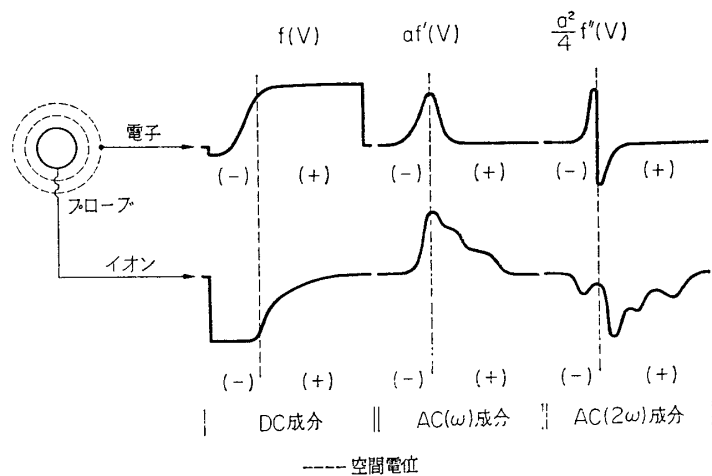
$$+ \left\{ a f'(V) + \frac{a^3}{8} f'''(V) + \dots \right\} \sin \omega t$$

$$- \left\{ \frac{a^2}{4} f''(V) + \frac{a^4}{48} f^{(4)}(V) + \dots \right\} \cos 2\omega t + \dots$$

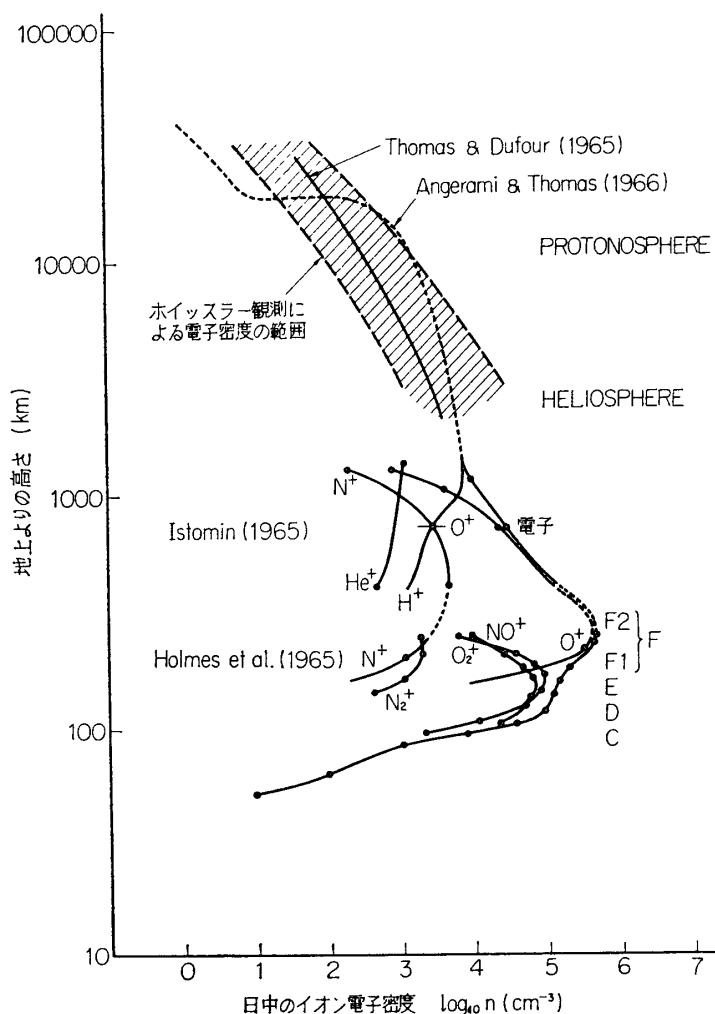
したがって、上式の直流成分から  $j = f(V)$  が、交流基本波成分から  $dj/dV = f'(V)$  が、第一高調波成分から  $d^2 j/dV^2 = f''(V)$  がそれぞれ得られる。

測定回路および測定波形の概略を第 5 図に示す。

第 6, 7 図は電離層中のイオン組成およびイオン温度を示している。これらの図から電離



第 5 図 測定回路および測定波形

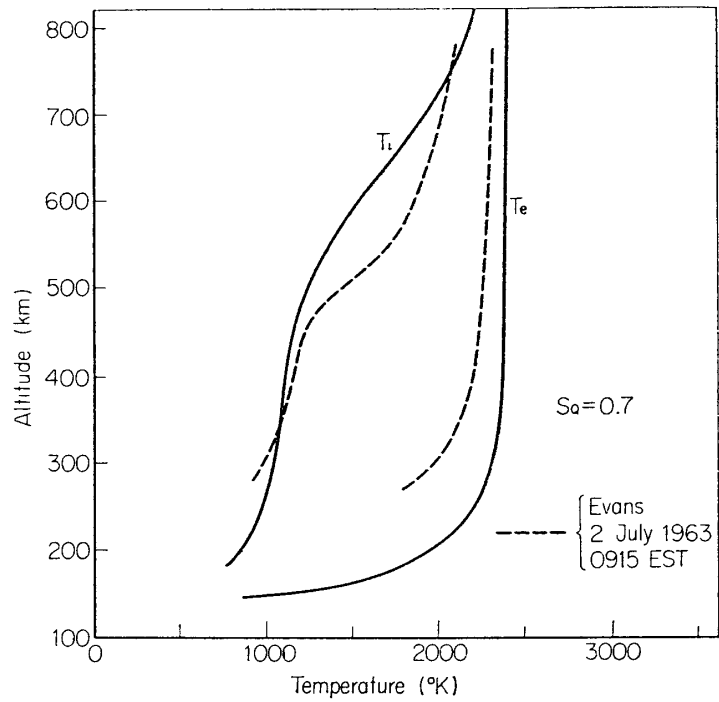


第6図 日中のイオンおよび電子密度分布

層中に存在するイオンの種類およびイオン密度，イオン温度の測定範囲がだいたい第3表のようにまとめられる。

一例として，プローブの有効捕集面積  $S=4\pi r_p^2=63.6\text{ cm}^2$ ，第一グリッド  $G_1$  にかける微小交流の振幅  $a=25\text{ mV}$ ，全イオン密度  $N_i=10^5\text{ cm}^{-3}$ ，飛しょう体の速度  $u_0=6,8\text{ km/sec}$ ，イオンの種類およびイオン温度の範囲は第3表のように仮定した場合のイオン電流  $f(V)$ ，微分イオン電流  $af'(V)$ ，二次微分イオン電流  $\frac{a^2}{4}f''(V)$  のプローブ電圧  $V$  に対する特性曲線の例を第8図から第13図に示す。同図中曲線上の数値はそれぞれのイオンの混合比を示す。

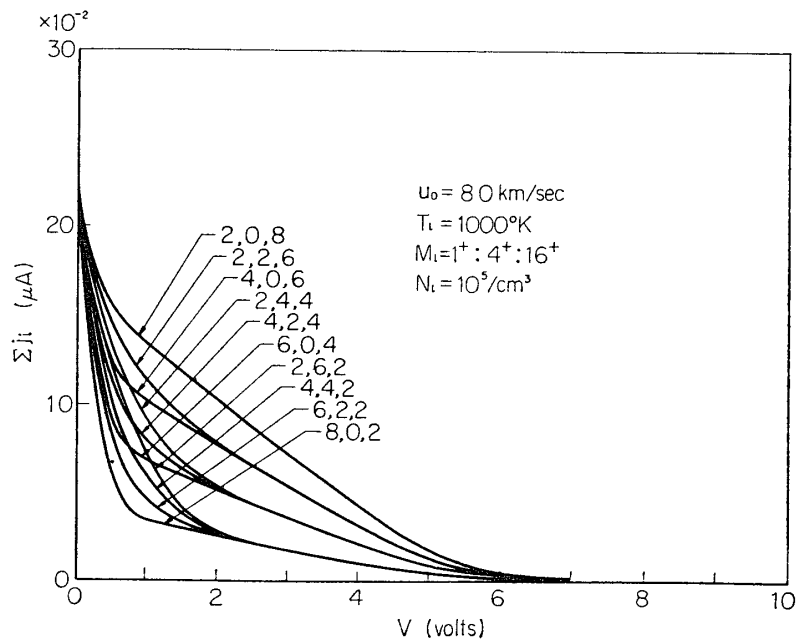
上述の結果から，電離層中では  $H^+$ ， $He^+$ ， $O^+$ ，質量数約30の一価のイオンの4種類のイオンを考えれば十分である。この場合，測定されるべきイオン諸量は各イオンの密度  $N_1$ ， $N_2$ ， $N_3$ ， $N_4$  およびイオン温度  $T_i$  の五つの量である。ここで，空間電位は電子の測定から，飛しょう体の速度は他の方法により，それぞれ正確にわかっているものとする。したがって，プローブから得られる電流-電圧特性，一次微分電流-電圧特性，二次微分電流-電圧特性



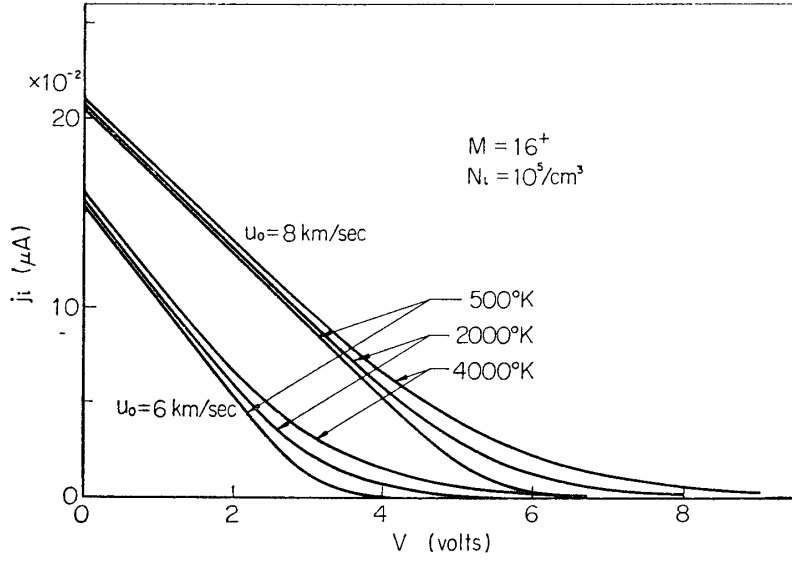
第7図 太陽黒点数最小期のイオンおよび電子温度分布

第3表 電離層中のイオン密度, イオン温度の測定範囲

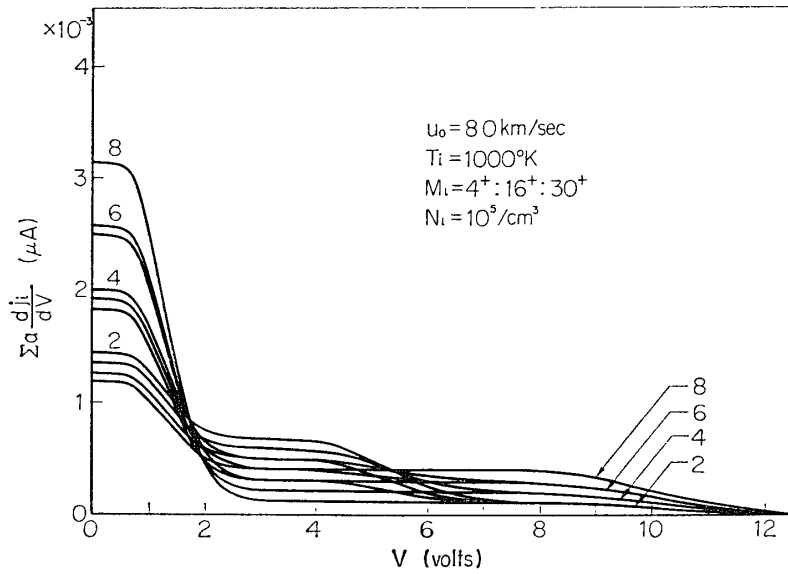
$M^+$	1	4	16	30
$N_i(\text{cm}^{-3})$	$10^3 \sim 10^5$	$10^3 \sim 10^5$	$10^3 \sim 10^7$	$10^3 \sim 10^7$
$T_i(^{\circ}\text{K})$	1000~4000	500~4000	500~4000	500~4000



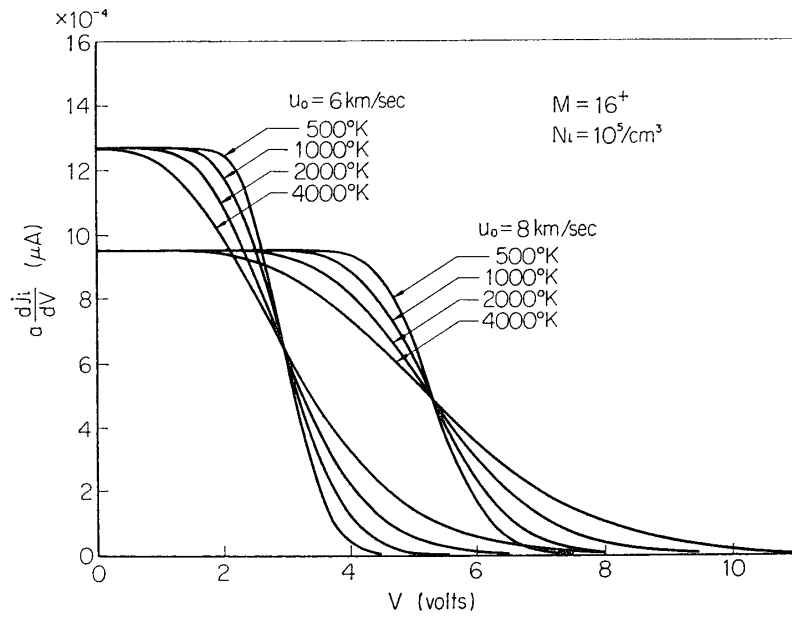
第8図 イオン電流-電圧特性 — 3種イオン混合 —



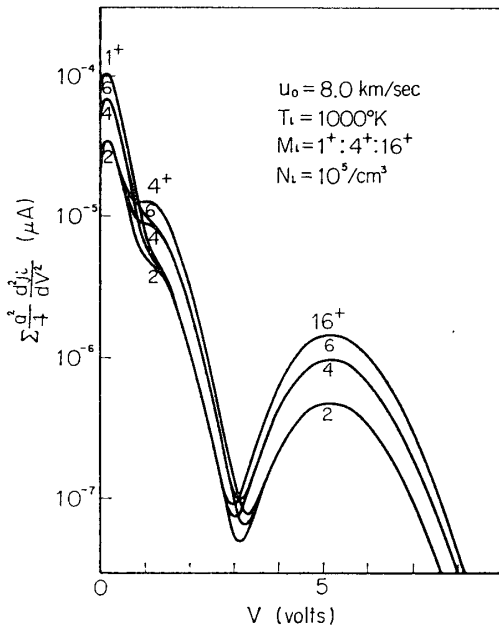
第9図 イオン電流-電圧特性 —温度変化—



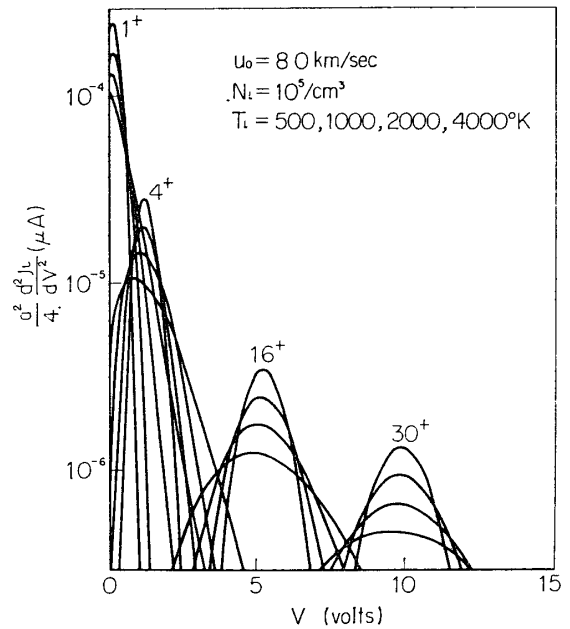
第10図 微分イオン電流-電圧特性 —3種イオン混合—



第 11 図 微分イオン電流-電圧特性 —温度変化—



第 12 図 二次微分イオン電流-電圧特性 —3 種イオン混合—



第 13 図 二次微分イオン電流-電圧特性 —温度変化—



の中から異なる五つの測定点をえらび出し、  
 上述の理論式を使えば、五つの未知数  $N_1, N_2, N_3, N_4, T_i$  が計算されるはずである。  
 測定点として適当と思われるものを次に示すと、

○電流-電圧特性

1.  $V=0$  の点

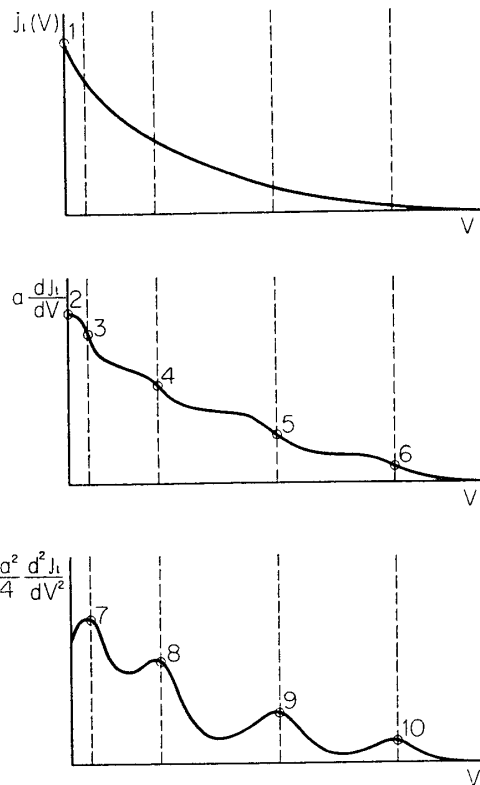
○一次微分電流-電圧特性

2.  $V=0$  の点
3.  $V = \frac{1}{e} \frac{M_1 u_0^2}{2}$  の点
4.  $V = \frac{1}{e} \frac{M_2 u_0^2}{2}$  の点
5.  $V = \frac{1}{e} \frac{M_3 u_0^2}{2}$  の点
6.  $V = \frac{1}{e} \frac{M_4 u_0^2}{2}$  の点

○二次微分電流-電圧特性

7.  $V = \frac{1}{e} \frac{M_1 u_0^2}{2}$  の点
8.  $V = \frac{1}{e} \frac{M_2 u_0^2}{2}$  の点
9.  $V = \frac{1}{e} \frac{M_3 u_0^2}{2}$  の点
10.  $V = \frac{1}{e} \frac{M_4 u_0^2}{2}$  の点

ここで、 $M_1: H^+$  の質量,  $M_2: He^+$  の質量  
 $M_3: O^+$  の質量,  $M_4: 質量数 30$  で一価のイオンの質量



第14図 測定点

第4表 測定点における電流の最大値, 最小値

	$u_0=6\text{ km/sec}$ のとき ( $\mu\text{A}$ )			$u_0=8\text{ km/sec}$ のとき ( $\mu\text{A}$ )					
		Min.	Max.	rate	Min.	Max.	rate		
$j_i$	1.	$1.53 \times 10^{-3}$	$1.62 \times 10$	$1.06 \times 10^4$	$j_i$	1.	$2.04 \times 10^{-3}$	$2.10 \times 10$	$1.03 \times 10^4$
	2.	$6.77 \times 10^{-6}$	$1.27 \times 10^{-1}$	$1.88 \times 10^4$		2.	$5.07 \times 10^{-6}$	$9.52 \times 10^{-2}$	$1.88 \times 10^4$
	3.	$9.79 \times 10^{-5}$	$1.02 \times 10^{-2}$	$1.04 \times 10^2$		3.	$7.57 \times 10^{-5}$	$7.61 \times 10^{-3}$	$1.01 \times 10^2$
	4.	$2.54 \times 10^{-5}$	$2.54 \times 10^{-3}$	$1.00 \times 10^2$		4.	$1.90 \times 10^{-5}$	$1.90 \times 10^{-3}$	$1.00 \times 10^2$
	5.	$6.34 \times 10^{-6}$	$6.34 \times 10^{-2}$	$1.00 \times 10^4$		5.	$4.76 \times 10^{-6}$	$4.76 \times 10^{-2}$	$1.00 \times 10^4$
	6.	$3.38 \times 10^{-6}$	$3.38 \times 10^{-2}$	$1.00 \times 10^4$		6.	$2.54 \times 10^{-6}$	$2.54 \times 10^{-2}$	$1.00 \times 10^4$
$a \frac{dj_i}{dV}$	7.	$1.26 \times 10^{-6}$	$2.80 \times 10^{-4}$	$2.22 \times 10^2$	$a \frac{dj_i}{dV}$	7.	$7.75 \times 10^{-7}$	$1.58 \times 10^{-4}$	$2.04 \times 10^2$
	8.	$1.76 \times 10^{-7}$	$4.98 \times 10^{-5}$	$2.83 \times 10^2$		8.	$9.88 \times 10^{-8}$	$2.80 \times 10^{-5}$	$2.84 \times 10^2$
	9.	$2.20 \times 10^{-8}$	$6.20 \times 10^{-4}$	$2.82 \times 10^4$		9.	$1.24 \times 10^{-8}$	$3.50 \times 10^{-4}$	$2.83 \times 10^4$
	10.	$8.55 \times 10^{-9}$	$2.42 \times 10^{-4}$	$2.83 \times 10^4$		10.	$4.80 \times 10^{-9}$	$1.36 \times 10^{-4}$	$2.83 \times 10^4$
$\frac{a^2 d^2 j_i}{4 dV^2}$					$\frac{a^2 d^2 j_i}{4 dV^2}$				

前例の数値計算で、10か所の測定点における電流の最大値および最小値は第4表に示すようになる。

### 5. ま と め

飛しょう体用測定プローブとしての球形プローブの長所は、プローブ自体に方向性を持たないので、飛しょう体の姿勢には無関係に測定ができるということである。短所は測定電流値が比較的小さいこと、およびプローブの製作がむずかしいということであるが、これらは技術的な問題である。なお、円筒形の場合は次の機会に述べる。

### 謝 辞

絶えざるご激励をいただいた東京大学宇宙航空研究所 平尾邦雄教授に深く感謝いたします。

1968年1月9日 宇宙科学

### 参 考 文 献

- [1] 宮崎 茂: 東大宇宙研報告, 第2巻, 第3号(A), P.946, 昭41年7月.
- [2] G. Medicus: J. Appl. Phys. 32, 2512 (1961).
- [3] 松浦延夫: 天文月報, 第59巻, 第7, 8号, p.146, 昭41年7, 8月.
- [4] Bowhill. S. A. and J. E. Geisler: Space Res. VI, p. 487 (1966).

### 〔付録 1〕

粒子の速度分布がドリフト速度  $u_0$  を重畳した Maxwell 速度分布をしているとき、粒子が速さ  $v \sim v + dv$  の間にある確率  $dP$  は

$$\begin{aligned} dP &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{v}{v_p} \right)^2 d \left( \frac{v}{v_p} \right) \int_0^\pi \exp \left( - \frac{v^2 + u_0^2 - 2vu_0 \cos \theta}{v_p^2} \right) \sin \theta d\theta \\ &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{\alpha}{\alpha_0} \right) \varepsilon^{-\alpha^2 - \alpha_0^2} \sinh(2\alpha\alpha_0) d\alpha \end{aligned} \quad (1)$$

ただし  $\alpha_0 = \frac{u_0}{v_p}, \quad \alpha = \frac{v}{v_p}, \quad v_p = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$

プローブに Retarding Potential  $V$  がかかっているとき、速さ  $v$  の荷電粒子に対するプローブの有効捕集半径  $P_g$  は次のように与えられる (第15図)。

エネルギー保存則  $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mv_p^2 + eV$

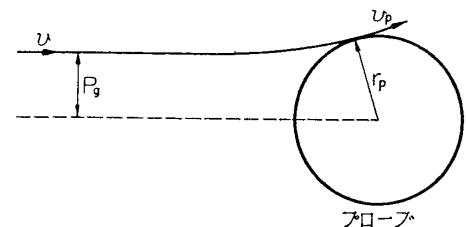
角運動量保存則  $P_g v = r_p v_p$

上式から  $v_p$  を消去すると、

$$P_g^2 = r_p^2 \left( 1 - \frac{2eV}{mv^2} \right) \quad (2)$$

ただし  $r_p$ : プローブ半径

(1)式によって表わされるような速度分布をした荷電粒子によってプローブに流れる電流  $j$  は



第15図 荷電粒子の軌跡

$$\begin{aligned}
j &= eN \int_{\alpha_v}^{\infty} \pi P_g^2 \cdot v \cdot d p \\
&= \frac{2\sqrt{\pi} e N r_p^2 v_p}{\alpha_0} \int_{\alpha_v}^{\infty} (\alpha^2 - \alpha_v^2) \varepsilon^{-\alpha^2 - \alpha v^2} \sinh(2\alpha\alpha_0) d\alpha \\
&= \sqrt{\pi} e N r_p^2 v_p \left[ \varepsilon^{-\alpha^2 - \alpha_0^2} \left\{ \frac{\alpha}{\alpha_0} \sinh(2\alpha\alpha_0) + \cosh(2\alpha\alpha_0) \right\} \right. \\
&\quad \left. + \frac{1}{\alpha_0} \left( \frac{1}{2} + \alpha_0^2 - \alpha^2 \right) E(\alpha - \alpha_0, \alpha + \alpha_0) \right] \quad (3)
\end{aligned}$$

ただし  $\alpha_v = \sqrt{\frac{2eV}{m v_p^2}}$

最後の式で  $\alpha \equiv \alpha_v$