

電離層測定プローブ

宮崎 茂*

Ionospheric Measuring Probe

By

Shigeru MIYAZAKI

Abstract: Basic Ionospheric parameters such as the electron density, the electron temperature, the ion density, the space potential and etc., have been measured by individual probe systems with the sounding rockets 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 plasma space potential relative to the vehicle potential, the mean ion mass, the ion composition and the ion temperature are measured by means of one trap-type 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

従来電離層基礎量の測定はおのおの別々のプローブによって行なってきたが、基礎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同時測定を行なう必要がある、この論文ではトラップ方式の電極を用いて基礎量を同時にかつ self-consistent に測定する方法を示してある。

1. 結 言

高度数十 km から数百 km に存在する電離層は電波伝ばの問題に関して重要であるばかりでなく、宇宙空間において起こる諸現象に密接な関連をもち、種々なる相互作用をもつために電離層の基礎量の測定の問題は電離層物理学研究はもとより、いわゆる宇宙空間の研究にとって重要である。さらにまた電離層の生成・消滅機構は太陽活動と非常に密接な関係があるので、太陽活動度による変化、季節変化、日変化の電離層の状態を長期にわたり、組織的系統的に観測することが必要である。

観測ロケットによる電離層の直接観測は 1960 年に始まって現在までに計 26 回行なわれ多くの貴重なデータを得てきた。従来電離層の電子密度、電子温度、イオン密度、空間電位

* 郵政省電波研究所

等の基礎量の測定はおのこの別々のプローブを用いて測定を行なってきたが、単一のプローブ系によって同時測定をすることが是非とも必要である。すなわち基礎量の精密な相互比較をする場合とかまた正イオン密度測定において上層大気中では単一のイオンのみが存在するのではなく複数のイオンの種類が存在するときなどは特に必要である。

さてロケットによる測定上の問題点として大きくわけて次の四つがあげられる。

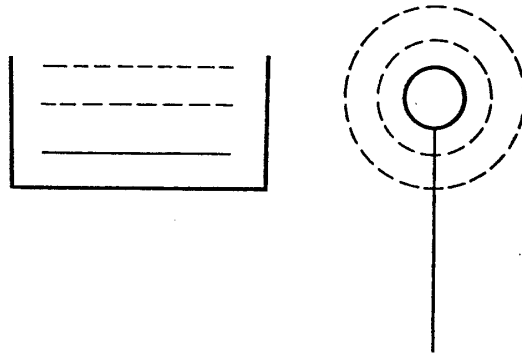
- (1) ロケットの高速運動および姿勢
- (2) テレメータ、レーダ系等を含めた測定器間の相互干渉
- (3) 地球物理的現象とプローブとの関連現象（たとえば光電子放出、磁場、電場などの問題）
- (4) 与えられた情報伝送系を用いての測定

上述の問題点のうちには測定の方法および設計のいかんによって回避ないし解決できるものと、原理的・根本的に解析上考察しなければならないものとの二つに分けられる。

ここでは上述の問題点を考慮して、電離層の基礎量を同時に測定する方法について考察した。すなわち電子密度、電子温度、ロケット電位対空間電位、イオンの平均分子量、イオンの種類、イオン温度などを同時に求め、いわゆる self-consistent な測定をするために考えられた方法である。この考え方は必ずしも original なものではないが、その測定法は現在までに行なわれた電離層観測の結果を検討して得られた方法である[1][2][3]。

2. プローブ系

第1図に示すごとく、トラップ方式の複数の電極を用いて基礎量を測定する。同図中左



第1図 プローブ系

図は平面形を示し、右図は球形を示したものである。平面形のは従来電離層観測において、イオン密度を測定するために用いられているイオン・トラップと同じ構造をもつものである。すなわち二つのグリッド G_1, G_2 とコレクター C の三つの電極よりなる。まず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 からの光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 には負の

一定電圧を印加して 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非常に小さいので主として電子の電流電圧特性と考えられる。すなわち 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。次にコレクター 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、イオン平均分子量、イオンの種類、イオン温度が決定できる。

実際の各電極に印加する電圧のモードは次の三つにわけられている。すなわち (1) 可変直流掃引電圧、(2) 直流電圧の上に小振幅の交流を重畳したもの、(3) 前項の交流を正弦波変調したものを順次切換えて G_1 に印加する。これについては後述する。

3. 測定原理

3-1. 電子密度、電子温度、空間電位

ロケットのごとき高速で運動する飛しょう体で電離層の基礎量を測定する場合、ロケットの電離層プラズマに対する相対運動を一般には考慮しなければならない。しかしながら電子の場合には、たとえば電子温度が 1000°K のとき電子の最大確率速度は約 174km になり、ロケットの速度にくらべて非常に大きいので、ロケットの相対運動は無視してよい。かくして静止プラズマの測定法をそのまま準用できる。いま平面プローブを考えて、その電子電流密度 j_e は、プローブ電圧が V のとき、

$$\text{減速電界: } j_e = j_{e0} \exp\left(-\frac{eV}{kT_e}\right)$$

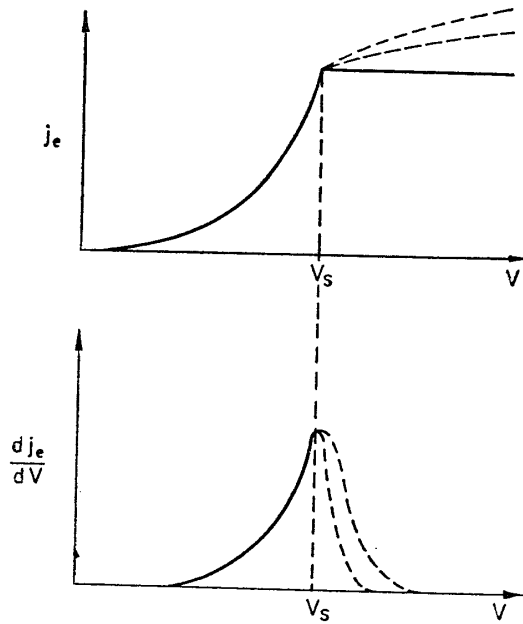
$$\text{加速電界: } j_e = j_{e0} = N_e e \sqrt{\frac{kT_e}{2\pi m}}$$

ただし、
 j_{e0} : 飽和電子電流密度
 N_e : 電子密度
 T_e : 電子温度
 k : ボルツマン定数
 m : 電子質量
 e : 電子電荷

第2図の上図はこの特性曲線を示す。空間電位において、電子電流は飽和値を示し、平面プローブではそれ以後一定値を示すが、円筒形および球形プローブでは点線に示すごとく、空間電位以上では増加を示す。これはプローブの周囲のシースが増大するためである。いずれの場合においても空間電位にて電子電流密度から、電子密度が前述の式によって求められる。この場合空間電位は電流電圧の半対数プロットの二直線の交点から求めるのであるが、実際にはこの方法ではかなりのあいまい性が伴う。そこで電流の電圧に対する微分について考えると次の如く表わされる。

$$\text{減速電界: } \frac{dj_e}{dV} = -\frac{e}{kT_e} j_{e0} \exp\left(-\frac{eV}{kT_e}\right)$$

$$\text{加速電界: } \frac{dj_e}{dV} = 0$$



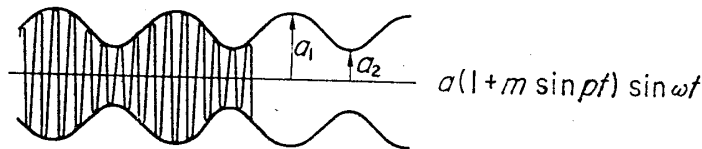
第2図 プローブ系特性曲線

この特性曲線は第2図の下図に示されている。上図と同様点線は円筒形および球形プローブの場合を示す。かくしていずれの場合においてもプラズマ空間電位において dj_e/dV は極大を示す。すなわち dj_e/dV 特性曲線の極大の位置から空間電位が求められる。

次に電子温度はプローブの電流電圧特性の逆電界の領域のいわゆる半対数プロットの直線のこう配から求めることができるが、電離層のごとき低密度プラズマではこの方法はかなりむずかしいので次に述べる交流重畳法が用いられる。すなわちプローブの直流電圧の上に微小振幅の交流正弦波を重畳する。そのときは与えた正弦波と同じ基本波のプローブ交流電流は次のごとく表わされる。すなわち $V \rightarrow V + a \sin \omega t$ として、

$$j_{\omega} = j_{e0} \exp\left(-\frac{eV}{kT_e}\right) \times 2I_1\left(\frac{ea}{kT_e}\right)$$

ここで a は交流の振幅は、 I_1 第一次の変形ベッセル関数を示す。この微小振幅の交流として第3図に示すごとき正弦変調波を用いて、その最大および最小振幅を a_1 および a_2 とす



第3図 正弦変調波

れば、

$$j_{\omega 1} = j_{e0} \exp\left(-\frac{eV}{kT_e}\right) 2I_1\left(\frac{ea_1}{kT_e}\right)$$

$$j_{e2} = j_{e0} \exp\left(-\frac{eV}{kT_e}\right) 2I_1\left(\frac{ea_2}{kT_e}\right)$$

この両者の比をとれば

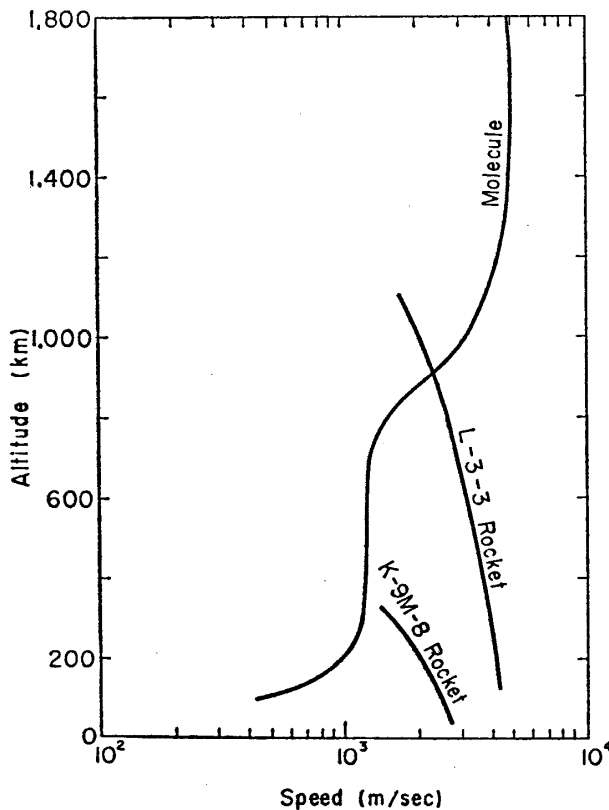
$$r = \frac{j_{\omega 1}}{j_{\omega 2}} = \frac{I_1\left(\frac{ea_1}{kT_e}\right)}{I_1\left(\frac{ea_2}{kT_e}\right)}$$

すなわちこの式で示されるごとく、出力交流の比をとれば a_1, a_2 は既知であるから、電子温度が求められる。

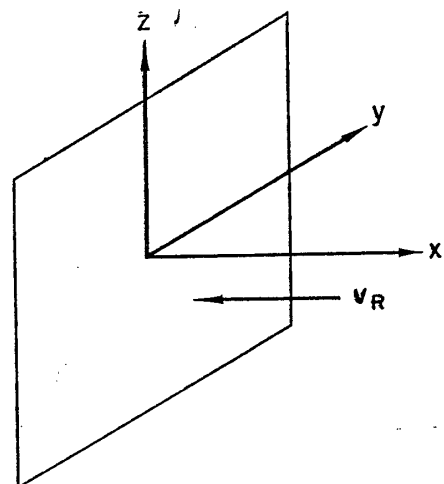
3-2. イオン密度, イオン温度, イオン平均分子量, イオン温度

イオンに関する諸量を測定する場合にはロケットの相対速度を考慮しなければならない。第 4 図はモデル大気から計算した分子の最大確率速度と、代表的なロケット K-9M-8 と L-3-3 の場合の速度を同時に示してある。この図によれば分子の速度にくらべてロケットの速度がかなり大きいことを示している。次に相対速度がある場合の平面プローブのイオン電流電圧特性について考える。

いま電離層プラズマ中をロケットが動いていくとき、逆にロケットに搭載された平面プローブが静止しているとして、プラズマがロケットの速度 v_R で流れてくるものとする。第 5 図に示すように平面プローブを考え座標軸を決める。かくしてプラズマ中のイオンの分布関



第 4 図 分子速度とロケット速度との比較



第 5 図 平面プローブと座標軸

数は次のように表わされる。

$$f(v_x, v_y, v_z) = \left(\frac{M}{2\pi kT_i}\right)^{3/2} \exp\left[-\frac{M}{2kT_i}\{(v_x - v_R)^2 + v_y^2 + v_z^2\}\right]$$

プローブ電圧が V のときのプローブのイオン電流密度は次の積分によって表わされる。

$$j_i = N_i e \int_{v_R}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} v v f dv_x dv_y dv_z$$

ここで

$$\frac{1}{2} M v v^2 = eV$$

実際に分布関数を代入して計算を実行すれば、

$$j_i = j_{i0} \left[\exp\left\{-\left(\frac{v_V - v_R}{v_P}\right)^2\right\} + V \sqrt{\frac{v_R}{v_P}} \left\{1 - \operatorname{erf}\left(\frac{v_V - v_R}{v_P}\right)\right\}\right]$$

ここで

$$v_P = \sqrt{\frac{2kT_i}{M}}$$

すなわち最大確率速度を示し、

$$\operatorname{erf}(X) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^X \exp(-y^2) dy$$

$$j_{i0} = N_i e \sqrt{\frac{kT_i}{2\pi M}}$$

ただし低密度プラズマにおいてプローブの電界がプラズマ中に浸透する効果すなわち浸透電界を考れば

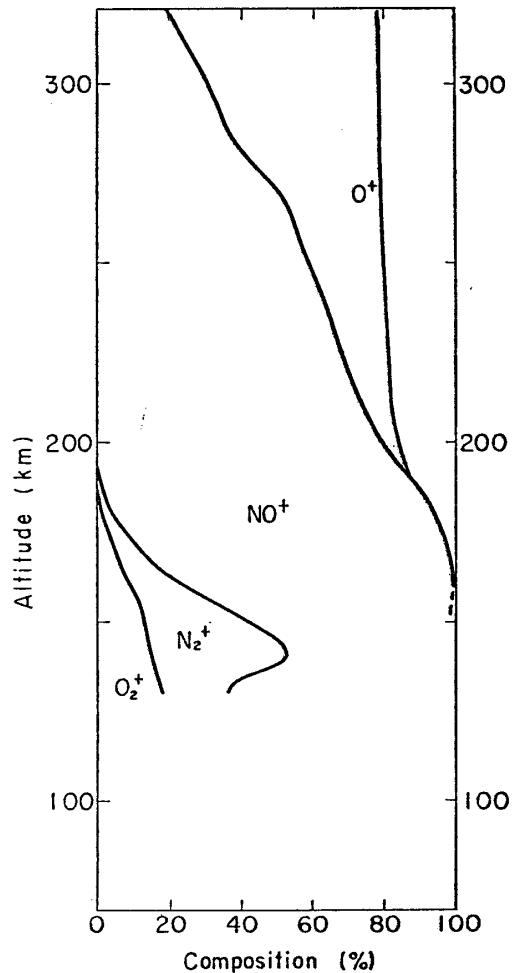
$$j_{i0} = N_i e \sqrt{\frac{kT_e}{\epsilon M}}$$

ϵ は自然対数の底を示し、 T_e は電子温度を示す。

以上は単一種類のイオンについて述べたのであるが、電離層中には単一種類のみイオンが存在するのではなく、多くの種類のイオンが存在する。すなわち電離層の下部では主として O_2^+ , NO^+ , N_2^+ イオンが存在し、上層にいくにしたがって O^+ へと移り、さらに He^+ , H^+ となって宇宙空間へと移行する。したがって M としてはそれぞれのイオンの質量に対応する M_1, M_2 を考えて、

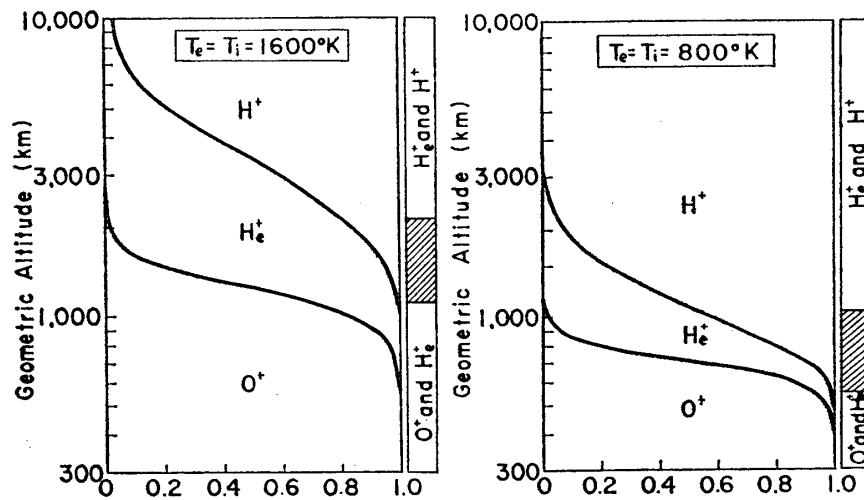
$$J_i = \sum_{1,2,\dots} j_i$$

について特性曲線を考えねばならない。この場合イオンの種類が多いと特性曲線が非常に複雑になり、解析が困難になる。第6図は1965年12月13日、15時20分鹿児島県

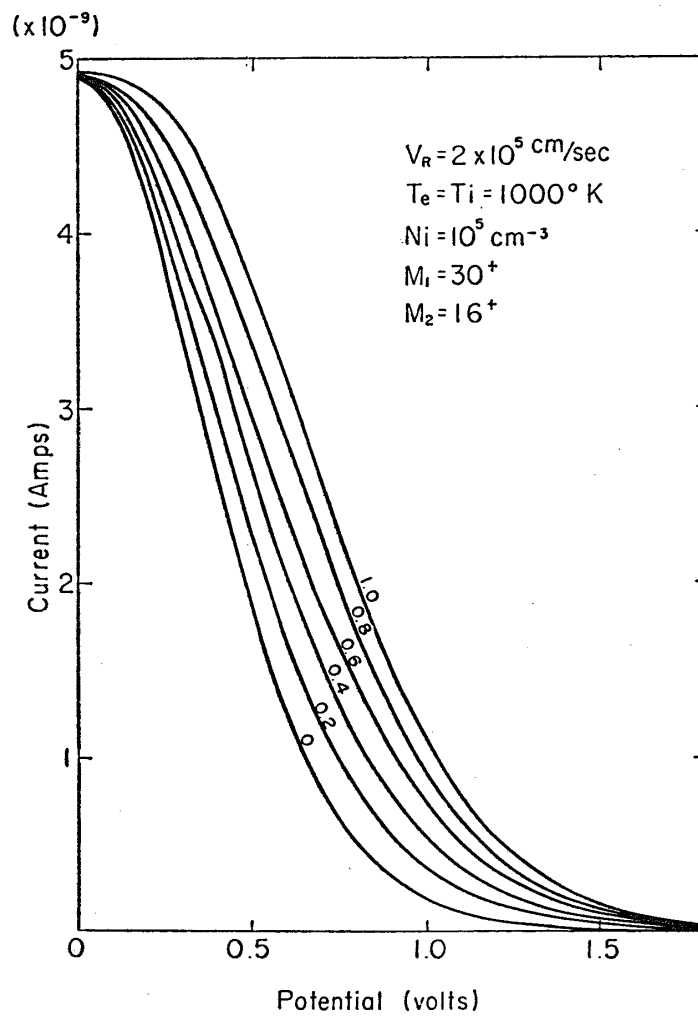


K-9M-16 1965.12.13, 15^h 20^m (Ascent)

第6図 イオン組成



第 7 図 イオン組成 (Moorcroft による[4])

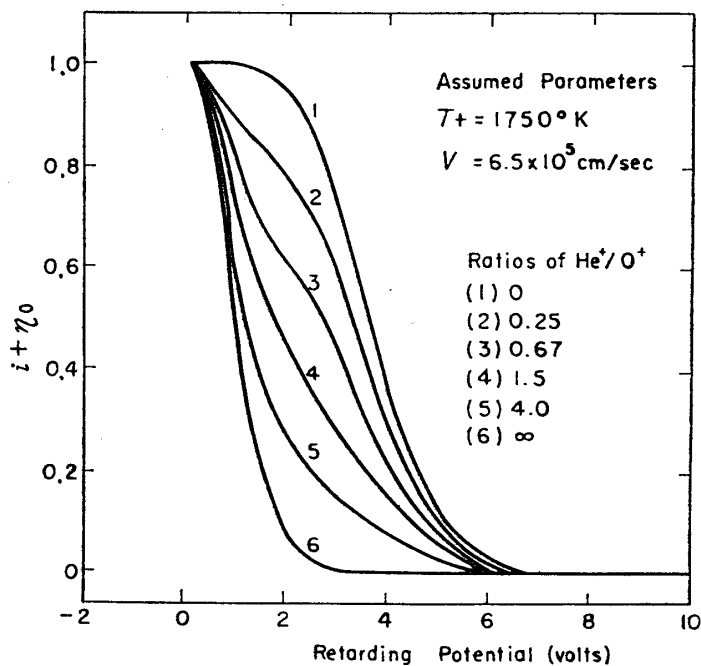


第 8 図 イオン電流特性

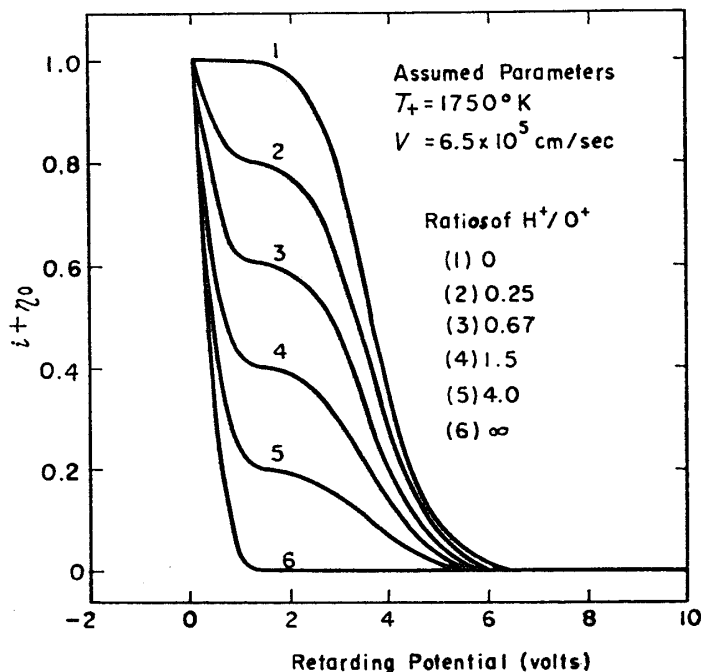
内之浦において K-9M-16 ロケットによりベネット型質量分析器によって観測したイオン組成である。これによると高度 200km 以下では主として NO^+ , N_2^+ , O_2^+ の分子量約 30^+ のイオンからなっており, 高度が上昇するにつれて, O^+ イオンになる。すなわちイオンとして 30^+ と 16^+ の 2 種類を考えればよい。ただしこの場合 O_2^+ , N_2^+ , NO^+ の判別は不可能に近いので厳密なイオン組成の測定には質量分析器によらねばならない。さらに第 7 図は理論的モデルによるイオン組成の分布[4]で, 下から O^+ から He^+ へと移ってさらに H^+ へと移行する。この場合三つの種類のイオンが同時に存在する領域があるが大部分は 2 種類のイオンの混合と考えて差しつかえない。

よってここでは 2 種類のイオンについて考える。第 8 図は $M_1=30^+$ と $M_2=16^+$ の 2 種類のイオンを考えて, ロケットの速度 $2 \times 10^5 \text{cm/sec}$, 電子温度, イオン温度共に 1000°K イオン密度 $1 \times 10^5 \text{cm}^{-3}$ の数値を仮定して, 計算によって得られたイオン電流電圧特性である。6 本の曲線の上に示された数値は全体のイオン密度に対する $M_1=30^+$ の密度の比を示してある。また第 9 図および第 10 図は文献 [5] から引用したイオン電流電圧特性曲線を示してある。第 9 図は He^+ と O^+ の場合, 第 10 図は H^+ と O^+ の場合を示してある。第 8 図から第 10 図によると, 特性曲線の判定から密度比を決定することはかなりむずかしい。すなわち曲線のあてはめからたとえ 2 種類のイオンさえも混合比を決定することは困難なので, 3 種類以上の場合では不可能に近いと考えられる。

しかしながらこれらの図において $V=0$ の点すなわち空間電位においては混合比のいかににかかわらず一定値を示していることがわかる。すなわちこの飽和値は全体の密度にのみ関係し, 混合比にはよらない。また $V=0$ において, $v_R \gg (kT_i/M)^{1/2}$ すなわちロケットの



第 9 図 イオン電流特性 (Banrdeau et al による[5])



第 10 図 イオン電流特性 (Banrdeau et al による[5])

速度がイオンの最大確率速度にくらべて非常に大きいときはイオン電流は次の近似式で表わされる。

$$J_{i0} \approx \sum j_{i0} 2\sqrt{\pi} \frac{v_R}{\sqrt{2kT_i}} = N_i e \sqrt{\frac{T_e}{T_i}} \frac{2\pi}{\epsilon} v_R$$

この場合ロケットの速度が大きいとイオンの質量によらないことがわかる。第 4 図からわかるように約 900km 以下ではこの近似式が有効に使用できることがわかる。

次にイオン電流密度の電圧に関する微係数を計算すると

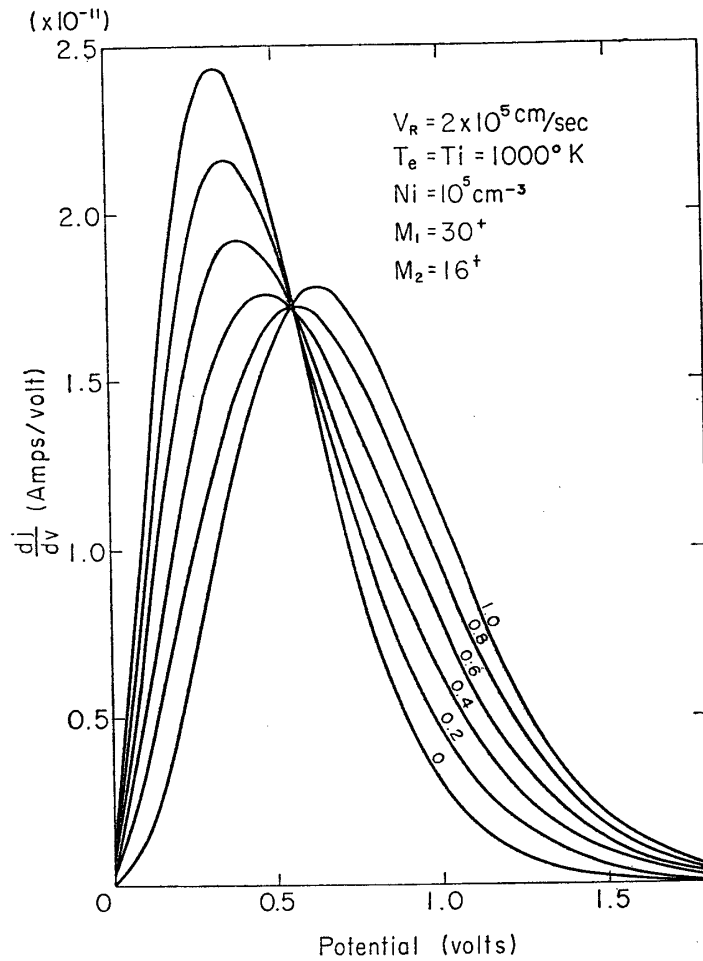
$$\begin{aligned} \frac{dj_i}{dV} &= -j_{i0} \left(\frac{v_V}{v_P} \right)^2 \frac{1}{V} \exp \left\{ - \left(\frac{v_V - v_R}{v_P} \right)^2 \right\} \\ &= - \frac{e^2 N_i}{kT_i} \sqrt{\frac{kT}{\epsilon M}} \exp \left\{ - \left(\sqrt{\frac{eV}{kT_i}} - \frac{v_R}{\sqrt{2kT_i}} \right)^2 \right\} \end{aligned}$$

かくして

$$\frac{dJ_i}{dV} = \sum \frac{dj_i}{dV}$$

これを第 8 図の場合と同じ数値の仮定のもとでグラフを絵くと第 11 図に示すごとくなる。この図によれば 2 種類のイオンの混合比に応じて極大の位置および高さが顕著に変化することがわかる。さらに極大を示す位置によって、2 種類のイオンが決定される。すなわち各イオンの質量に応じて

$$V_{\max} = \frac{M_i v_R^2}{2e}$$



第11図 イオン電流の微係数特性

が計算できるので、極大値の存在する位置からイオンの種類が決定される。

以上述べたことにより、イオンの飽和電流 J_{i0} は全体の密度 N_i とイオン温度 T_i のみの関数で表わされ、微係数最大の位置 V_{\max} は2種類のイオン密度の存在比 r と T_i との関数で表わされ、また微係数の大きさ $(dJ_i/dV)_{\max}$ は N_i, T_i, r の関数で表わされる。すなわち、

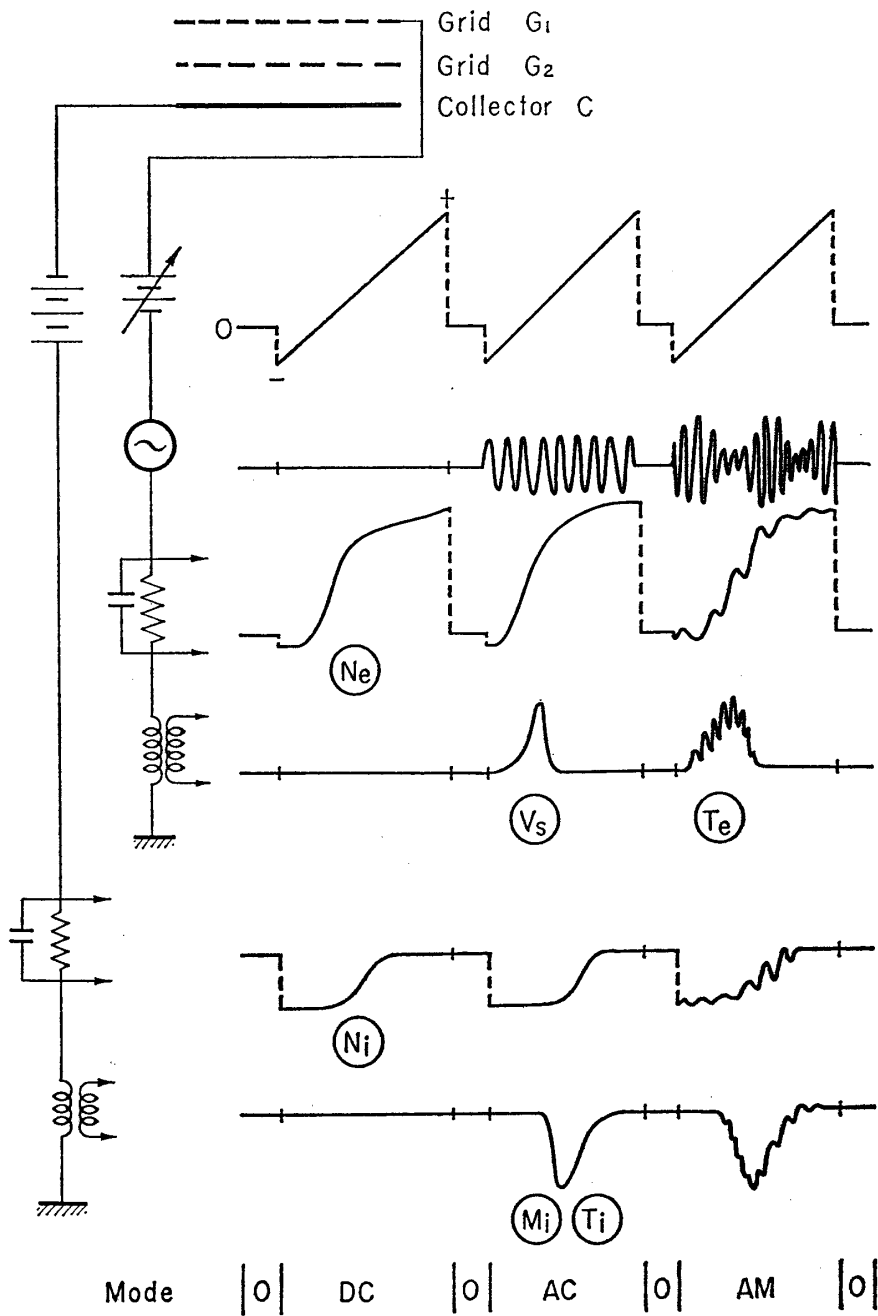
$$J_{i0} = F_1(N_i, T_i)$$

$$V_{\max} = F_2(r, T_i)$$

$$\left(\frac{dJ_i}{dV}\right)_{\max} = F_3(N_i, T_i, r)$$

これらの関数についてあらかじめ数値計算を行ない、数表なり計算図表を用意しておけば、実際のデータからイオンに関する諸量が求められる。

以上は厳密な理論的考察の結果であるが、イオンの平均分子量 \bar{M} を仮定するならば、イオン電流の電圧に関する微係数は次のごとく表わされる。



第 12 図 測定回路および波形

$$\frac{dJ_i}{dV} = -J_{i0} \frac{e}{kT_i} \exp \left\{ - \left(\sqrt{\frac{eV}{kT_i}} - \frac{v_R}{\sqrt{2kT_i}} \right)^2 \right\}$$

極大値の位置から \bar{M} が計算できる。すなわち

$$\sqrt{\frac{2eV_{\max}}{\bar{M}}} = v_R$$

$$\therefore \bar{M} = \frac{2eV_{\max}}{v_R^2}$$

また極大値の大きさを知ることにより，次式によってイオン温度が求められる。

$$\frac{\left(\frac{dJ_i}{dV}\right)_{\max}}{J_{i0}} = \frac{e}{kT_i}$$

かくのごとく平均分子量 \bar{M} を用いれば簡単に N_i, T_i などが求められるが，実際には若干の誤差を伴う。しかし電離層プラズマの測定においては十分この方法が使用できるものと思われる。

4. 測定回路および測定波形

第12図に示すごとくグリッド G_1 には三つのモードの電圧を印加する。まず直流掃引電圧のみの DC モード，次は微小振幅の交流を重畳した AC モード，さらにその交流を振幅変調した AM モードである。これら三つのモードを順次切換えて印加する。次いでグリッド G_1 に流れる電流の直流分および基本波交流分を別々にとり出して，検出する。ここで交流の基本波は微係数に比例する。同様にコレクター C に流れる電流も直流分と基本波の交流分にわけて検出する。第12図には代表的な特性曲線の例を模式的に示し，前節3で述べた方法により各種の基礎量を丸印で示した部分の特性曲線から求められることを示してある。

5. 結 言

電離層の基礎量のうち電子密度，電子温度，空間電位，イオン密度，イオン平均分子量，イオンの種類を単一のプローブ系で測定する方法を述べたのであるが，ここでは平面形の場合を示してある。球形の場合は次の機会に述べることにする。

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。

1966年6月6日

参 考 文 献

- [1] Hoffman, D.S.: The Theory and Experimental Results on an Ionospheric Probe Experiment. Ionospheric Research Scientific Report, No. 260, Pennsylvania State University, Jan. (1966).
- [2] Hirao, K. and Miyazaki, S.: Rocket-Borne Ionospheric Direct-Sounding Instruments. J. Radio Res. Labs. Vol. 12, No. 64, pp. 357-380, (1965)
- [3] Dote, T., Takayama, K. and Ichimiya, T.: Analysis of Probe Characteristics in Drifting Plasma. J. Phys. Soc. Japan. Vol. 17, No. 1, pp. 174-183, (1962)
- [4] Moorcroft, D.R.: On the Determination of Temperature and Ionic Composition by Electron

- Backscattering from the Ionosphere and Magnetosphere. *J. Geophys. Res.* Vol. 69, No. 5, pp. 955-970, (1964)
- [5] Bourdeau, R. E. and Bauer, S. J.: Structure of the Upper Atmosphere Deduced from Charged Particle Measurements on Rockets and the Explorer VIII Satellite. *Space Research III*, pp. 173-193, (1962)