

電離層測定プローブ (III)*

—円筒形 Retarding Potential Trap—

宮崎 茂**・森 弘隆**

Ionospheric Measuring Probe (III)

By

Shigeru MIYAZAKI and Hirotaka MORI

Abstract: Basic ionospheric parameters such as electron density, electron temperature, ion density, ion temperature, space potential, etc., have till now been measured by individual probe system in use with the space vehicles. However, it is necessary to measure all the ionospheric parameters at the same time by a single probe assembly especially for detailed comparison between the parameters or for measurement of the ion density when there are many ion species in the ionosphere.

This paper describes the method of measuring the electron density, electron temperature, plasma space potential relative to vehicle potential, ion composition, and ion temperature at the same time by the use of Faraday cap type probe assembly. This method of measurement is considered for the purpose of obtaining 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混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、円筒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

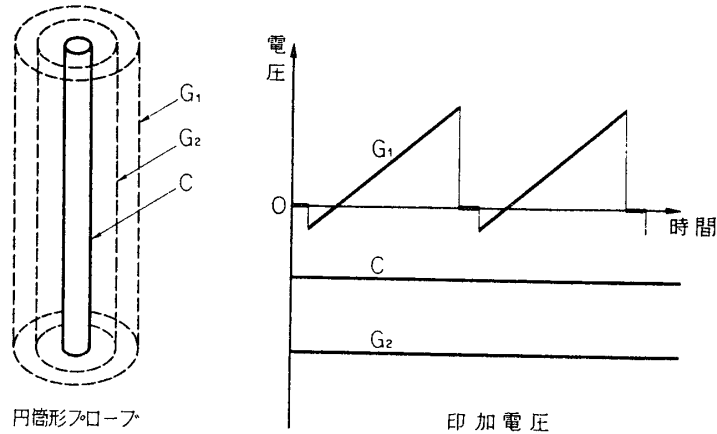
電離層プラズマ諸量の self-consistent な測定法の開発の重要性については、前回の報告 [1][2] で述べたとおりである。今回取り扱う円筒形プローブはその形状の幾何学的性質により製作が容易であり、また測定にあたっては端効果およびプローブによるプラズマのじょう乱などを十分小さくできるので、精度の高い測定が可能である。

2. 測定電極

円筒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

* 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



第 1 図 円筒形プローブの構造と電極に印加する電圧

3種の電極からなる。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、プローブ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 からの二次電子および光電子放射を防ぐためにコレクター C に対してかなり大きな負電圧を印加する。コレクター C には一定の負電圧を印加して、グリッド G_1 を通過したイオンだけを捕集する。グリッド 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、グリッド G_1 の特性曲線から電子に関する量すなわち電子密度、電子温度およびプラズマ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、イオン混合比、イオン温度などが決定できる。

3. 測定原理

3.1 イオン密度、イオン混合比、イオン温度

前回の報告 [1] で述べたように、電離層中の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くらべて飛しょう体の速度を無視することはできないので、飛しょう体のプラズマに対する相対運動を考慮しなければならない。

飛しょう体の速度の円筒形プローブの軸に対して直角方向の成分を u_0 とすると、グリッド G_1 にイオンに対して Retarding potential である正電圧 V を印加したときのコレクター C に流れるイオン電流式は M. Kanal [3] によって次のように与えられる。

$$J(V) = 4eN_i v_p r l \exp(-\alpha_0^2 - \eta) \int_0^\infty \alpha v^2 \exp(-\alpha v^2) I_0(z) d\alpha v \quad (1)$$

$$v_p = \sqrt{\frac{2\kappa T_i}{M}}, \quad \alpha_0 = \frac{u_0}{v_p}, \quad \eta = \frac{eV}{\kappa T_i}, \quad z = 2\alpha_0(\alpha v^2 + \eta)^{1/2}$$

N_i : イオン密度 r : プローブの半径
 T_i : イオン温度 l : プローブの長さ
 M : イオン質量 κ : ボルツマン常数

I_0 : 変形ベッセル関数

上式を電圧 V で微分すると次式のようなになる。

$$\frac{dJ(V)}{dV} = \frac{4e^2 N_i v_p r l}{\kappa T_i} \exp(-\alpha_0^2 - \eta) \int_0^\infty \alpha v^2 \exp(-\alpha v^2) \left\{ 2\alpha_0 \frac{I_1(Z)}{Z} - I_0(Z) \right\} d\alpha v \quad (2)$$

$$\frac{d^2 J(V)}{dV^2} = \frac{4e^3 N_i v_p r l}{\kappa^2 T_i^2} \exp(-\alpha_0^2 - \eta) \times \int_0^\infty \alpha v^2 \exp(-\alpha v^2) \left\{ 4\alpha_0^4 \frac{I_2(Z)}{Z^2} - 4\alpha_0^2 \frac{I_1(Z)}{Z} + I_0(Z) \right\} d\alpha v \quad (3)$$

I_0, I_1, I_2 : 変形ベッセル関数

以上は単一種類のイオンが存在するときの計算であるが、複数の種類のイオンが存在するときはその和について計算する必要がある。すなわち、

$$J = \sum_{1,2,\dots} J_k, \quad \frac{dJ}{dV} = \sum_{1,2,\dots} \frac{dJ_k}{dV}$$

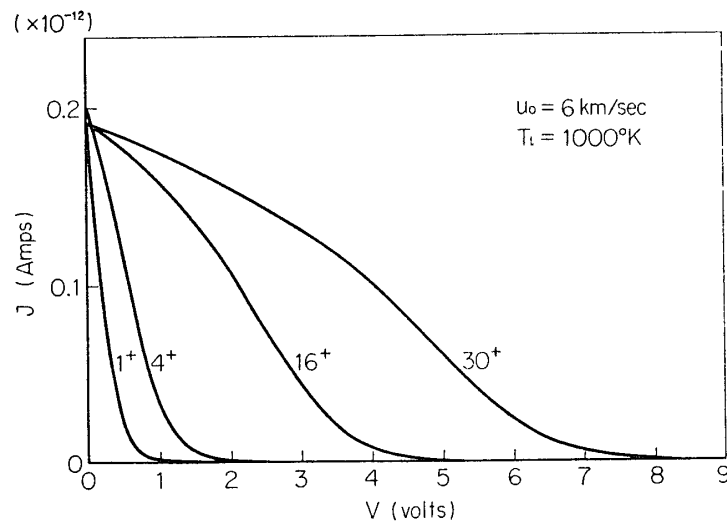
さて、電離層中に存在するイオンの種類、イオン密度およびイオン温度については前報告[2]の考察に従い、イオン諸量の測定範囲を第1表のように定める。

第1表 電離層中のおもなイオンの種類およびイオン密度、イオン温度の測定範囲

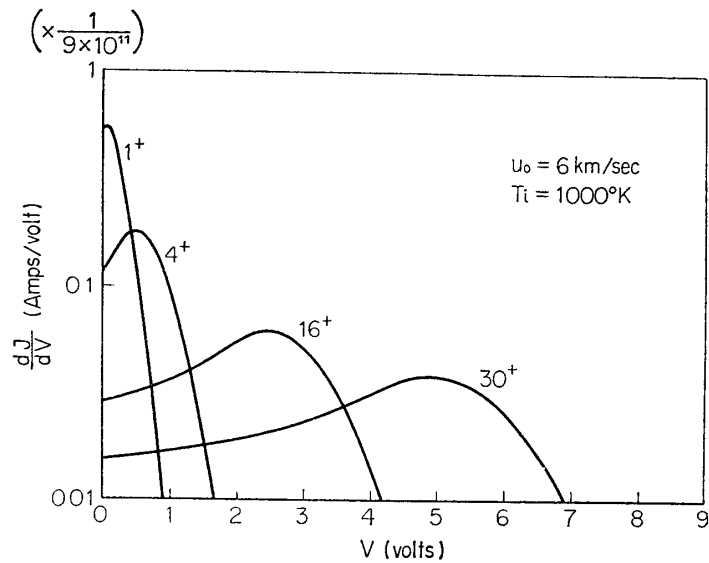
イオン	H ⁺	He ⁺	O ⁺	(NO ⁺)
質量数	1	4	16	30
密度 N_i (cm ⁻³)	10 ³ ~10 ⁵	10 ³ ~10 ⁵	10 ³ ~10 ⁷	10 ³ ~10 ⁷
温度 T_i (°K)	1000~4000	500~4000	500~4000	500~4000

ここで、半径 $r=1$ cm のプローブで長さ $l=1$ cm の部分に流れるイオン電流 $J(V)$ および微分イオン電流 $dJ(V)/dV$ を (1), (2) 式を使って電子計算機によって数値計算を行った結果を示す。

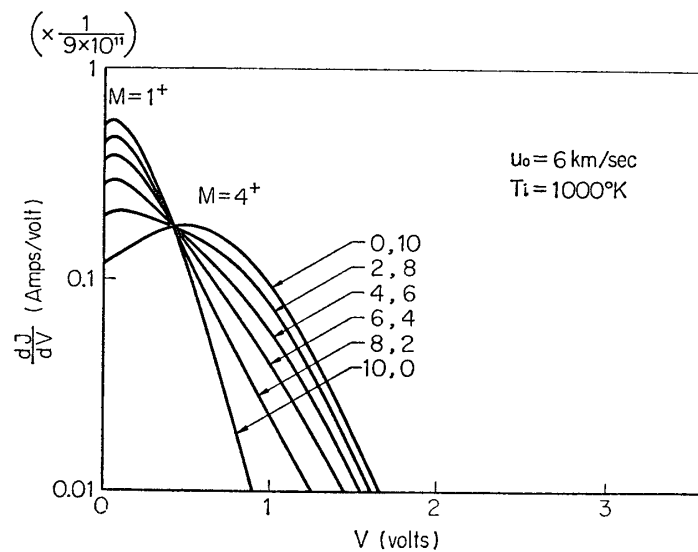
第2図および第3図は $u_0=6$ km/sec のときイオン密度 $N_i=1$ cm⁻³、イオン温度 $T_i=1000^\circ$ K のイオン $M=1^+, 4^+, 16^+, 30^+$ がおのおの単独に存在している場合のイオン電流-



第2図 イオン電流



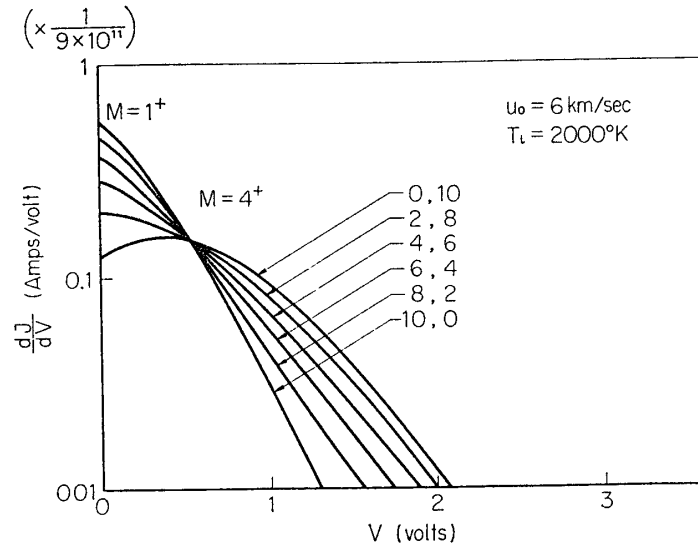
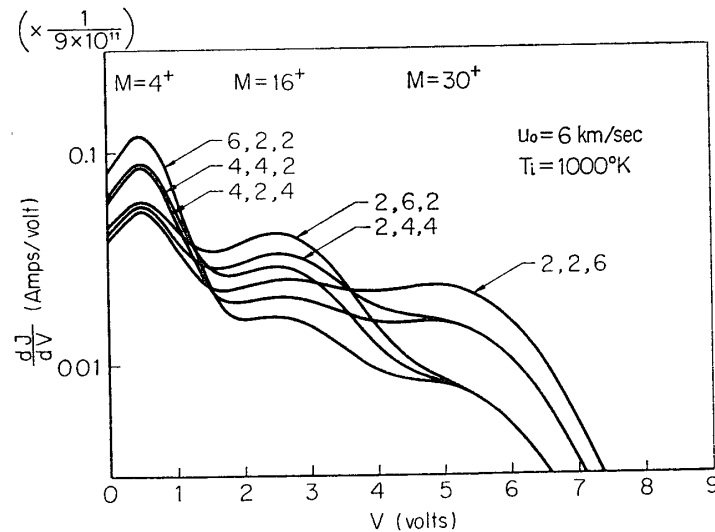
第3図 微分イオン電流



第4図 微分イオン電流(2種イオン混合, $T_i=1000^\circ\text{K}$ の場合)

電圧曲線および微分イオン電流-電圧曲線をグラフに表わしたものである。横軸はグリッド G_1 にかける電圧である。第4図および第5図は、 $u_0=6 \text{ km/sec}$ のとき、全イオン密度 $N_i=1 \text{ cm}^{-3}$ として、 $M=1^+$ と 4^+ のイオンが混在しているときの微分イオン電流-電圧曲線でイオン温度 $T_i=1000^\circ\text{K}$, 2000°K の場合の例である。グラフ上の数字はそれぞれのイオンの混合比を示している。第6図および第7図は、前図と同様の条件で $M=4^+$, 16^+ および 30^+ のイオンが混在している場合のグラフである。

さて、前述のような特性曲線から実際にイオン諸量を求める場合、原理的には未知数の数と等しい独立な測定点を選ばばよい。測定点としては値が大きく読み取り誤差の少ない点か

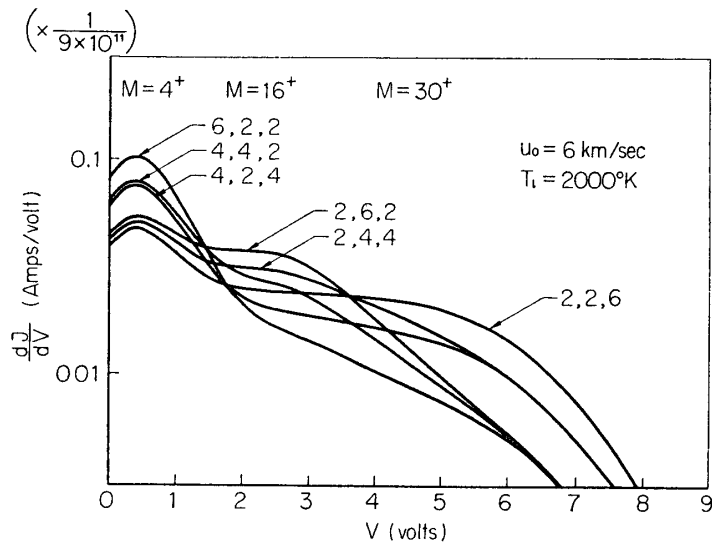
第5図 微分イオン電流(2種イオン混合, $T_i=2000^\circ\text{K}$ の場合)第6図 微分イオン電流(3種イオン混合, $T_i=1000^\circ\text{K}$ の場合)

望ましいが、微分イオン電流のピークの値はそのような条件を満足していると思われる。そこで、測定点としてピークの値を選んだときの解析法について述べる。第8図は $u_0=6\text{ km/sec}$, $M=16^+$ の場合にイオン温度 T_i によって微分イオン電流の形が変化する様子を示している。このグラフからピーク的位置は温度によって変化することがわかる。一般にピーク的位置を与える式は(3)式を0とする式であるから、次の積分式を解けばよい。

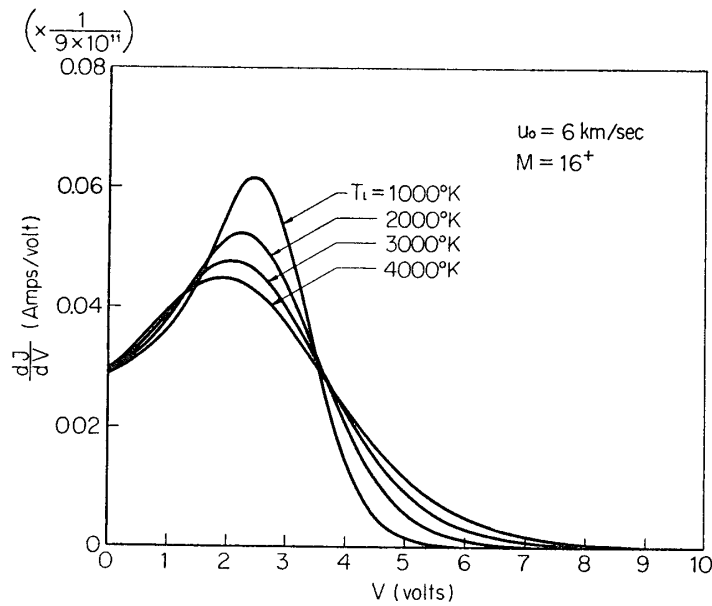
$$\int_0^\infty \alpha v^2 \exp(-\alpha v^2) \left\{ 4\alpha_0^4 \frac{I_2(Z)}{Z^2} - 4\alpha_0^2 \frac{I_1(Z)}{Z} + I_0(Z) \right\} d\alpha v = 0$$

$$Z = 2\alpha_0 (\alpha v^2 + \eta)^{1/2}$$

α_0 に具体的に数値を代入し、数値計算によって上式を満足する η の値を求め、その結果をグラフにすると第9図のようになる。図中○点は数値計算の結果で、×点は $\alpha_0^2 - \eta$ を記し



第 7 図 微分イオン電流 (3 種イオン混合, $T_i=2000^\circ\text{K}$ の場合)



第 8 図 微分イオン電流 (温度による変化)

た. 図から明らかのように×点は直線上に並んでおり, その傾きは計算により 1.077 になるので, 計算値を近似的に次式で表わせることがわかる.

$$\eta = \alpha_0^2 - 1.077 \alpha_0$$

したがってこの近似式を (2) 式に代入すれば, ピークにおける微分イオン電流の理論式が与えられる. その他の測定点として微分イオン電流のピークに対応するイオン電流値を選べば, その値を与える理論式は上の近似式を (1) 式に代入すれば得られる.

上に述べた方法は第 6 図のように各イオンに対応するピークが明瞭に現われている場合には有効であるが, 第 4 図および第 5 図の $M=4^+$ イオンのようにピークが明瞭に現われていない場合には適用できない, この場合には $\eta = \alpha_0^2$ すなわち $V = Mu_0^2/2e$ の位置におけるイ

オン電流値および微分イオン電流値を測定すれば、それに対応する理論式は $V=Mu_0^2/2e$ を(1),(2)式に代入して得られる。ただしこの場合、プラズマ空間電位および u_0 は他の方法で求める必要がある。

3.2 電子密度, 電子温度, プラズマ空間電位

電子の平均熱運動速度は、たとえば電子温度が 1000°K のとき約 174 km/sec になり飛しょう体の速度にくらべて非常に大きいので、飛しょう体の相対速度は無視できる。したがって、電子に関する諸量の決定については従来の静止プラズマ中のラングミュア・プローブによる測定法と同様なので省略する。

4. 測定法

プローブの電流-電圧特性からイオン電流 J , 微分イオン電流 dJ/dV を求める方法について述べる。プローブの第1グリッド G_1 の直流電圧に微小振幅の交流電圧 $a \sin \omega t$ を重畳すると、捕集される電流 j は次の様に表わされる。

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

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

$$+ \left\{ a \frac{df(V)}{dV} + \frac{a^3}{8} \frac{d^3 f(V)}{dV^3} + \dots \right\} \sin \omega t$$

$$- \left\{ \frac{a^2}{4} \frac{d^2 f(V)}{dV^2} + \frac{a^4}{48} \frac{d^4 f(V)}{dV^4} + \dots \right\} \cos 2\omega t + \dots$$

したがって、 a の値が小さくて上の展開式の直流成分、交流基本波成分の係数が展開級数の第1項目で十分近似できる場合には、直流成分から $J=f(V)$ が、交流基本波成分から dJ/dV

第2表 イオン電流の $V=0$ における値 $\times 10^{-13}(\text{Amps.})$

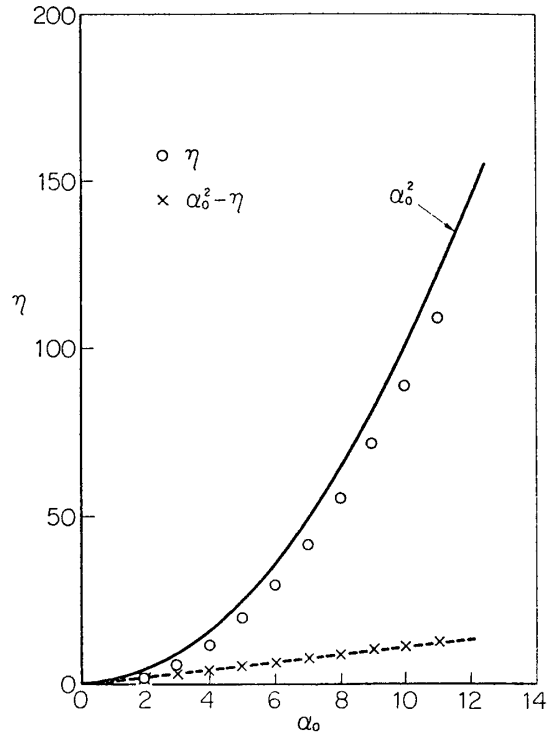
$M \backslash T_i$	1000	2000	3000	4000
1	2.16	2.42	2.66	2.89
4	1.98	2.04	2.10	2.16
16	1.93	1.95	1.96	1.98
30	1.93	1.94	1.94	1.95

$u_0=6 \text{ km/sec}, r=l=1 \text{ cm}, N_i=1 \text{ cm}^{-3}$

第3表 微分イオン電流の最大値 $\times 10^{-14}(\text{Amps.})$

$M \backslash T_i$	1000	2000	3000	4000
1	2.97	2.94	2.78	2.04
4	0.995	0.856	0.800	0.768
16	0.342	0.290	0.264	0.248
30	0.212	0.180	0.163	0.152

$a=50 \text{ mV}, u_0=6 \text{ km/sec}, r=l=1 \text{ cm}, N_i=1 \text{ cm}^{-3}$



第9図 微分イオン電流の極大の位置

$=df(V)/dV$ がそれぞれ得られる.

1例として, 交流振幅 $a=50\text{ mV}$, イオン密度 $N_i=1\text{ cm}^{-3}$, イオン温度 $T_i=1000\sim 4000\text{ }^\circ\text{K}$, 飛しょう体速度のプローブの軸と直角方向の成分 $u_0=6\text{ km/sec}$ のとき, 半径 $r=1\text{ cm}$ の円筒形プローブの長さ $l=1\text{ cm}$ の部分に流れる各種イオンのイオン電流 $f(V)$ および微分イオン電流 $adf(V)/dV$ を計算すると第2表および第3表のようになる. 一般に, プローブの表面積 $S\text{ cm}^2$, イオン密度 N_i の場合には, 表の値を $SN_i/2\pi$ 倍すれば与えられる.

5. ま と め

飛しょう体搭載用プラズマ測定プローブとしての円筒形プローブのイオン電流-電圧特性について考察したが, このプローブの最大の長所は電極の精密な製作が容易なことであり, また半径 r と長さ l の比 l/r を大きくすれば, 端効果およびプローブ周囲のプラズマのじょう乱を少なくできるので精度の高い測定が可能である. 短所としては, 理論式の計算において数値解析を行わなければならないこと, および平面プローブ [1] の微分イオン電流のピークや球形プローブ [2] の二次微分イオン電流のピークにくらべて円筒形プローブの微分イオン電流のピークの現れ方はあまり明瞭でないので, ピークの位置および高さを測定する方法は常に最適な方法とは言えない.

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6月13日

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] 宮崎 茂, 森 弘隆: 東大宇宙研報告, 第4巻, 第2号, p. 101, 昭43年4月.
- [3] M. Kanal: J. Appl. Phys. **35**, 1697 (1964).