

逆電位アナライザ特性の図的処理による  
イオン温度の解析法とその応用\*

南 繁行\*\*・堤 四郎\*\*・竹屋 芳夫\*\*

(1981年12月26日受理)

A graphical method to obtain the ion temperature from retarding  
potential analyzer characteristics

By

Shigeyuki MINAMI, Shirou TSUTSUMI and Yoshio TAKEYA

**Abstract:** In this paper an improved data analysis method to deduce the ion temperature from a voltage to current characteristic of the retarding potential analyzer is dealt with. Usually optimum fitting procedures using a digital computer have been used in order to obtain the ion temperature  $T_i$ . But these methods need much time to search the parameters. The graphical method is developed to obtain the  $T_i$  quickly. This method is suitable not only for the processing of a large quantity of data but also for the inflight data analysis aboard the sounding rocket. In this paper the principle of this method and its application are shown.

**KEY WORDS**

Retarding potential analyzer

Ion temperature

Data analysis method

**概 要**

逆電位アナライザ(RPA)特性から図的解析法によってイオン温度を導出する方法についてのべる。RPA特性から通常は最適フィット法により電子計算機を用いてイオン温度が導出される。しかしその実行には長時間のCPU使用が必要である他、もし特性上にノイズ等によるひずみが存在しても、これはそのまま計算処理される欠点

---

\* 宇宙研特別事業費による論文

\*\* 大阪市立大学工学部

をもっている。本論文では RPA 特性においてイオン温度は、飛翔体速度、アタックアングル、イオン質量によって決定されることを利用した新しい図的解析法についてのべる。またこの方法を飛翔体上で電子回路的に行なうことにより、イオン温度が実時間で測定できることを示す。

[重要語]

逆電位アナライザ, イオン温度, データ解析法

## 1. ま え が き

上層プラズマのイオン温度測定に用いられる逆電位アナライザ (Retarding Potential Analyzer; 以下 RPA) は、飛翔体とプラズマの相対速度を利用したマルチグリッド型静電アナライザ (Boyd, 1950; Ionov et al, 1964; Haug et al., 1968) の一種である。RPA は上層プラズマのイオン温度測定用として Gringanz 氏 (1957) 以来、20 余年にわたって使用され、その理論的取扱いは Whipple 氏 (1959) によってなされた。また、RPA が持つ多くの誤差発生因子について多くの研究がなされている。(Knudsen, 1965; Hanson, 1972; 南他, 1981 など)。RPA では飛翔体速度によっておきるイオン質量ごとの相対的な流れエネルギーの違いを利用してイオン質量を知ることができる (Hanson et al., 1970 など) ほか、最近では人工衛星に搭載され、火星大気の温度分布観測 (Hanson et al. 1977) などがなされている。

著者らは過去 10 年にわたり主としてロケットに RPA を搭載して電離層高度でのイオン温度の垂直分布の観測を行なってきた (Minami et al. 1981)。人工衛星で得られるイオン温度の高度分布はかなり離れた水平距離を移動中に比較的長時間を要して観測されたデータによるものであり、位置の違いによる水平方向の温度勾配を多分に含むことになるほか、時間的な変化に対する効果も含まれていることになる。これに比べてロケット観測では、これらの効果が低減されることから、高度分布の観測に威力を発揮することができる。

さて、RPA ではグリッドに印加したエネルギー分析電圧に対するコレクタ補集イオン電流の特性を取得することになるが、この特性は多くのパラメータに依存するため従来からイオン温度決定には、多変数の最適フィッティングが電子計算機を用いて行なわれてきた (Patterson, 1969; Minami et al., 1982)。これらの方法の特徴は多変数の導出を同時に行なうことができることであり、その反面、処理には長い時間を要する。また RPA 特性を AD 変換して全自動でデータ解析する場合、個々の特性に含まれる雑音成分の状態を判断できないことがある。著者らがここで述べる RPA 特性の図的処理方法とは 1 フレーム毎のデータの 1 部を抽出した結果からイオン温度を測定する方法である。最初にその原理と適用例を示し、次に測定精度の検討を行なう。また、この方法を電子回路的に行なうことにより高速度でイオン温度を取得し、空間分解能を向上することができることを示し、電離層でのロケットによる試験結果とその有用性について論じる。

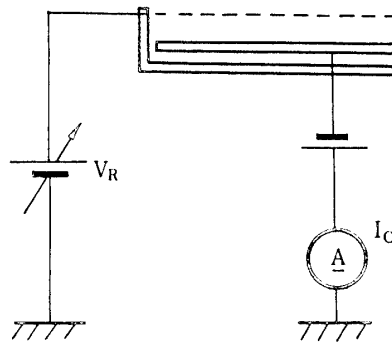
2. 逆電位アナライザ特性の図的処理方法

RPAは第1図に示すように負バイアスされたイオンコレクタと、その前面にあるエネルギー分析グリッドで構成されている。今グリッド電圧を $V_R$ としプラズマ密度 $N$ 、イオン温度 $T_i$ 、イオン質量 $m$ 、飛翔体速度 $v_0$ 、RPAが平板としてグリッドの法線と飛翔体速度ベクトルのなす角 $\theta_a$  (アタックアングル)、グリッド面積を $S$ 、RPAの空間に対する電位 $V_s$ をゼロとすれば、イオン電流 $I_c$ は次式で与えられる。(南他, 1980 b)。

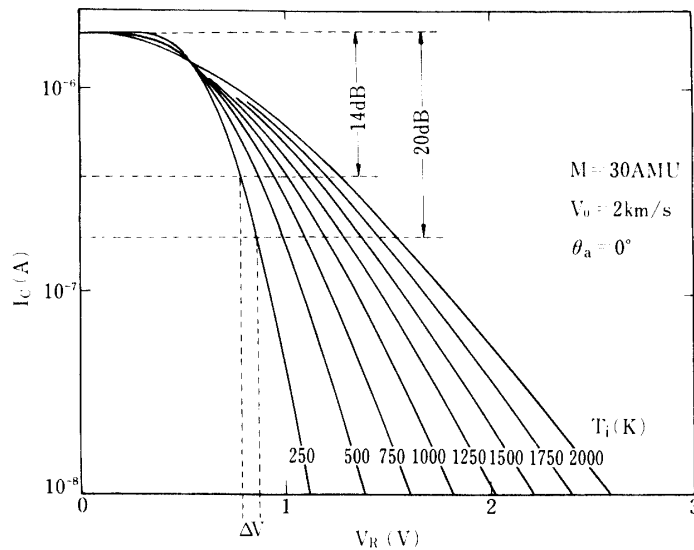
$$I_c = eNS\eta \int_{V_R}^{\infty} v f(v) dv$$

$$= eNS\eta \left\{ \frac{v_0 \cos \theta_a}{2} (1 + \operatorname{erfx}) + \sqrt{\frac{KT_i}{2\pi m}} e^{-x^2} \right\} \dots\dots\dots(1)$$

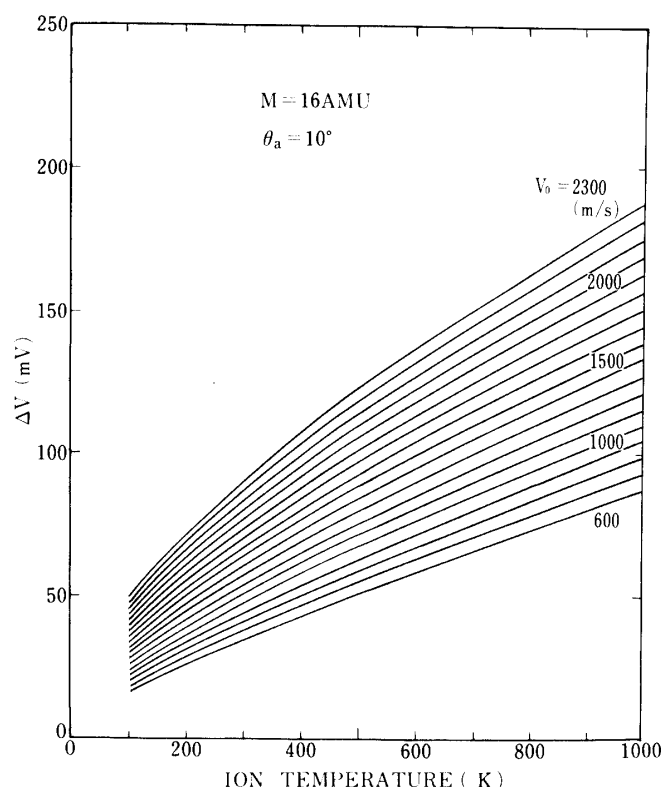
ここで



第1図 RPA特性の測定方法



第2図 図的処理によりイオン温度を求める方法

第3図 イオン温度  $T_i$  と  $\Delta V$  の計算図表の一例

$$x = \sqrt{\frac{m}{2KT_i}} \left( v_0 \cos \theta_a - \sqrt{\frac{2e}{m} \cdot \sec^2 \theta_a V_R} \right) \dots\dots\dots(2)$$

ここで  $\eta$  はグリッドの有効透過率で、 $e$  は電気素量、 $f(v)$  はイオンの速度分布関数である。第2図は式(1)を数値計算した例で  $T_i$  をパラメータとしている。 $M$  はイオン質量数である。

図形処理による方法とは、第2図において  $M, v_0, \theta_a$  が与えられると特性の傾きはイオン温度  $T_i$  に対して一意的に決まることを利用したものである。いま傾きの代表値として飽和電流より  $-14$  dB 及び  $-20$  dB 減少するときの間の分析電圧 (グリッド電位) の差  $\Delta V$  を用いる。第3図のようにこの  $\Delta V$  と  $T_i$  の関係図を  $m, v_0, \theta_a$  をパラメータとして必要な範囲について作製した。RPA で得られた1フレームの  $V_R$ - $I_c$  特性からスケールにて  $\Delta V$  を読みとることにより直接決定できる。電子温度をラングミュアプローブで得る場合のイオン電流の補正等の考慮は不要である。むしろ、イオン飽和電流が  $T_i$  に依存しないことが、この方法にとって重要である。この方法では飛翔体速度  $v_0$  が  $500$  m/s 以上のとき  $T_i$  が  $200$  K ~  $2500$  K で適用可能である。

なお、 $v_0$  と  $\theta_a$  は飛翔体の電波追跡及び各種姿勢形から得る。

この方法では RPA の基準電位 (まわりのプラズマに対する電位)  $V_s$  とプラズマ密度  $N$  を考慮する必要がない。しかしイオン質量数  $M$  を決定することが出来ない。実際得られる宇宙空間でのデータでは、イオン質量  $m$  は急変するものではなく、単一のイオンが卓越して

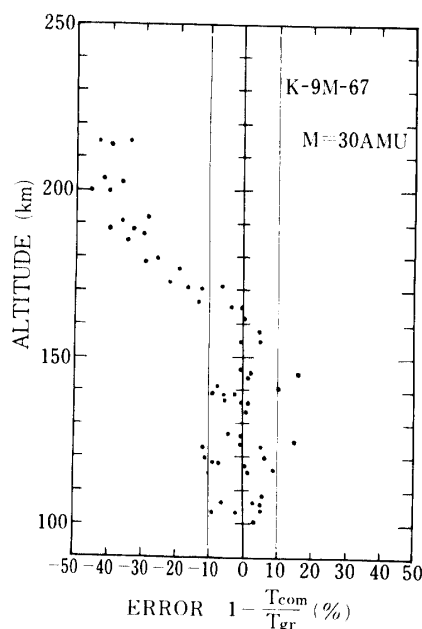
いる場合が多い。むしろこの方法は次に述べるイオン温度のリアルタイム測定のために用いると効果的である。

### 3. 実際のデータへの適用と考察

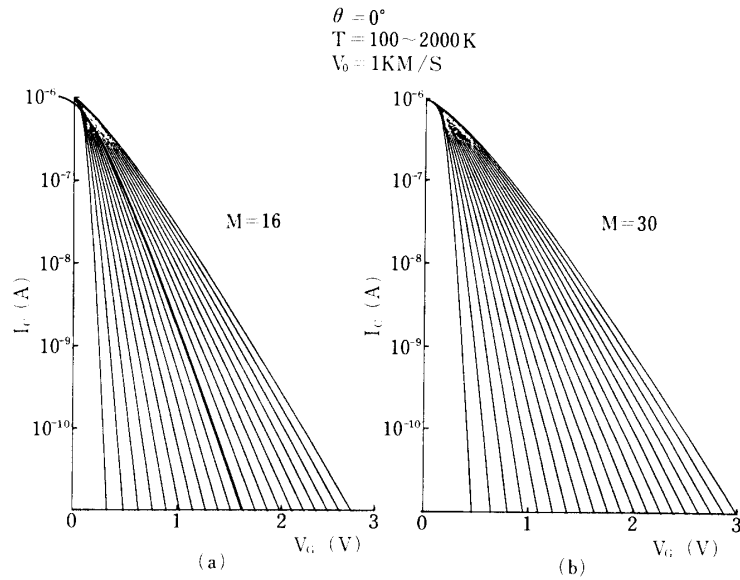
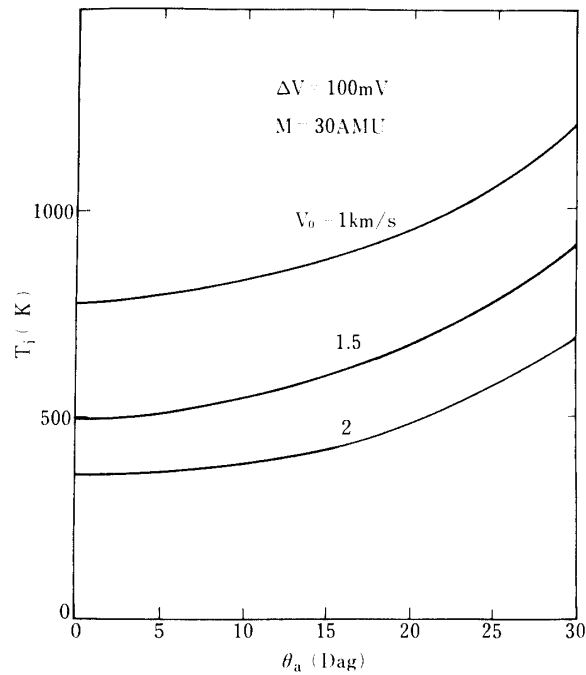
第4図は、実際にロケットに搭載したRPAで得られた特性にこの方法を適用して解析した結果である。ここで $T_{gr}$ ,  $T_{com}$ はそれぞれ図的処理方法及び計算機を用いた最適フィットによるデータ処理法で得られたイオン温度値である。電離層では高度160 kmから190 kmにイオン質量の遷移層があり (Johnson, 1966; Both, 1974) その上空は $NO^+$ , それ以下は $O^+$ が卓越している。同図の $T_{com}$ は $m_i$ も含めて求めた結果である。 $T_{gr}$ は全データでイオンを $NO^+$  (30 AMU) と仮定して取扱った。両者の結果は、高度150 km以下においてよく一致している。

次にこの図的方法の性質について検討する。第5図は2つの異なるイオン質量 (16 AMU, 30 AMU) におけるRPA特性を温度 $T_i$ が100 K~2000 Kについて100 K間隔で示したものである。ここで $M$ が30 AMUにおける1000 Kの特性の傾きは $M$ が16 AMUの1100 Kのときの傾きと重ねることができる (図(a)の太線)。しかし両者は飽和電流付近では一致しない。また特性の2点のみをデータとして用いるので、特性に重畳した雑音成分の統計的な処理をすることができない。従ってS/Nのよいデータを必要とする。

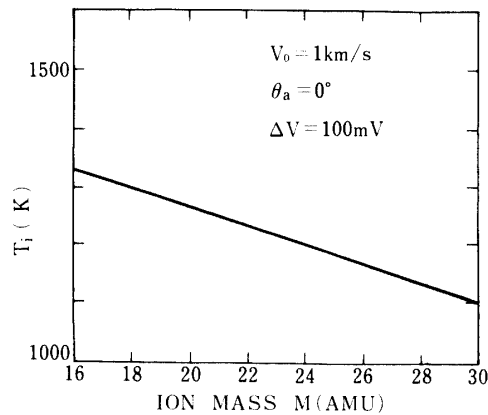
図的処理法では、 $m_i, v_0, \theta_a$ の各パラメータをステップ状に選んで、 $\Delta V - T_i$ 図表を作成することになる。ここではそのために生じる誤差について検討する。第6図は、 $\Delta V$ が100 mVのとき、 $v_0$ をパラメータとして $\theta_a$ に対するイオン温度 $T_i$ の依存性を示した図である。 $v_0$ が



第4図 2つの異なった方法により求めたイオン温度の差の解析例

第5図 RPA特性の計算例 ( $T_i = 100 \sim 2000 \text{ K}$ ,  $100 \text{ K}$ きざみ)第6図アタックアングル $\theta_a$ による温度決定の違いの計算例

1~2 km/s において $\theta_a$ が $30^\circ$ 付近のとき、最大 $\theta_a$ の $1^\circ$ につき約 $40 \text{ K}$ の誤差が生じる。従って常に数パーセントの精度を得るには、 $\theta_a$ については $2^\circ$ ステップで図表を作製することが必要である。第7図は仮定したイオン質量の違いによって生じる温度 $T_i$ の依存性を示したものである。 $M$ が $30 \sim 16$ に変化していく遷移領域では、その平均質量に対応してこの図



第7図 イオン質量数の仮定と違いにともなう  $T_i$  の値の変化の例

のように温度の読み取り値が変化していくことがわかる。

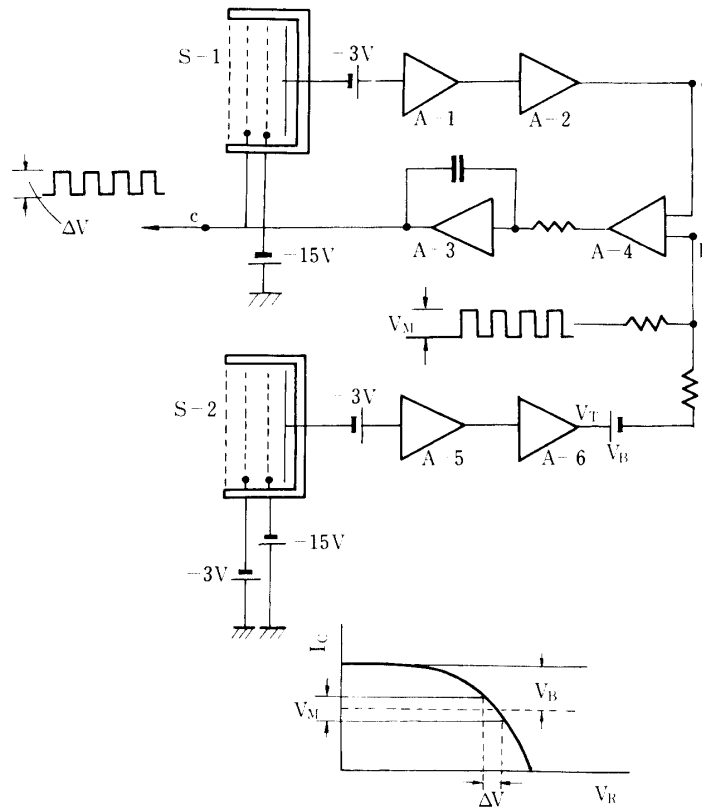
この図的処理方法は、得られた RPA 特性を 1 フレームごとに目視して処理していく点に特徴がある。1 フレームのデータのうち一部の特性を抽出してデータとするため、信号の S/N がよいことが必要であるが、逆に AD 変換を含め自動化によりデータを算出する場合は、特性にウェイク等によるひずみ (Samir et al., 1965) が重畳されていても、見のがすことが起りうる。従って単に処理時間の差 (1 フレームから  $T_i$  を決定するのに電子計算機 FACOM 230-60 にて 60 分を要する) のみならず、この方法のような入力データの処理法を相補的に用いることの利点は大きいと考えられる。

なお、この節で取扱った RPA 特性は、K-9M-67 号機に搭載した RPA により得られたものである。

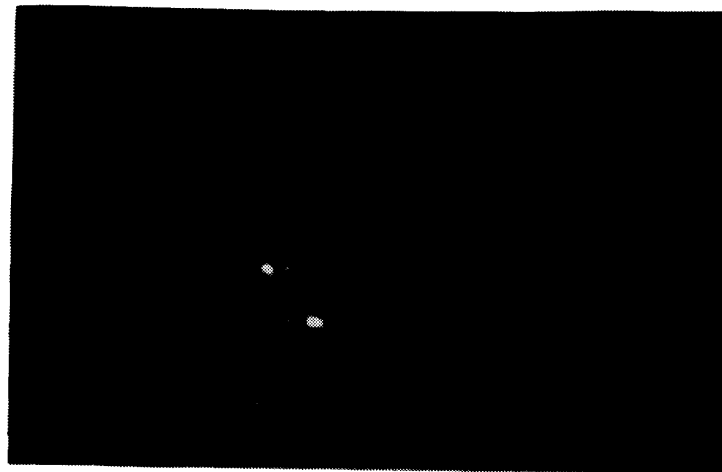
#### 4. イオン温度のリアルタイム測定装置

前節において RPA 特性の傾きを読み取ることによりイオン温度  $T_i$  を決定する方法について述べた。ここでは RPA 特性におけるこの性質を応用してリアルタイムで直接イオン温度を得る方法と、その適用について述べる。

いま、イオン電流飽和値  $I_{co}$  から 20 dB, 14 dB 減少させるエネルギー分析電圧  $V_R$  の差を  $\Delta V$  とする (第 2 図)。イオン質量  $m_i$ 、飛翔体速度  $v_0$ 、及び平板 RPA のグリッド面の法線と  $v_0$  ベクトルのなす角  $\theta_a$  (アタックアングル) の 3 つのパラメータが他の方法で求まるとき、イオン温度  $T_i$  は  $\Delta V$  によって一意的に決まる。この原理を応用して機上で電子回路的に処理することによって、1 フレーム全体の RPA 特性を取得する従来の方法に比べて、きわめて速い繰り返しでイオン温度を計測することができる。宇宙空間の測定では、 $m_i, v_0, \theta_a$  は急変しないので、 $\Delta V$  の空間的な変化は  $T_i$  の変化とみなすことができるためである。第 8 図にリアルタイムでイオン温度を測定する装置のブロック図を示す。RPA の電圧電流特性 ( $V_R$ - $I_c$  特性) 全体を取得せずに  $\Delta V$  のみ連続測定する。このため 2 つの平板 RPA ( $S_1, S_2$  と呼ぶ) を使用する。簡単のためセンサ  $S_1, S_2$  とそれに付属したイオン電流増幅器は、同

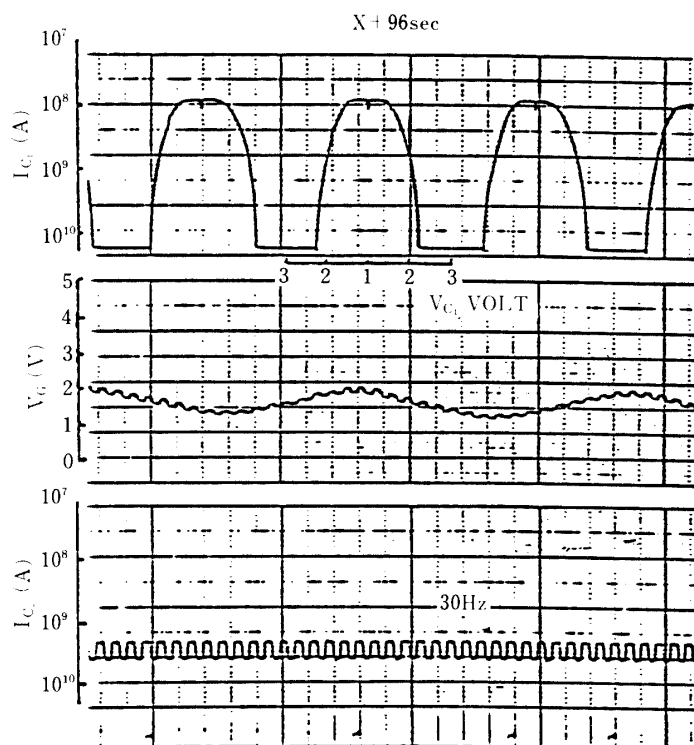


第8図  $T_i$ のリアルタイム測定装置のブロック図とRPAの静特性の説明



第9図 室内実験で得られた動作テストの1例  
(横軸  $0.1V/div$ , 縦軸  $2 \times 10^{-8} A/div$ . 静特性を同時に描くため対数表示でない)



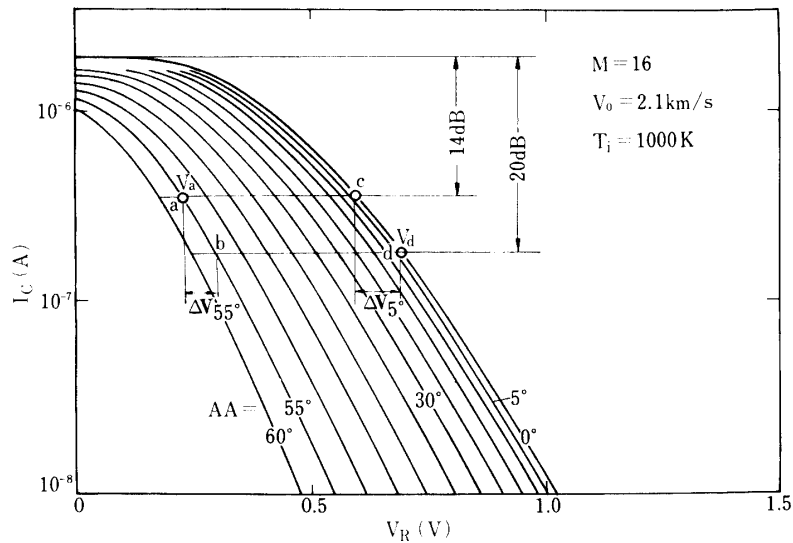


第10図 ロケットに搭載された $T_i$ リアルタイム測定装置によるデータの1例 (高度約170km)

じ形状, 特性のものを用いるとする。いま先に述べた2つの電流値の差6 dBに相当する対数増幅器の出力電圧の差を $V_M$ とする。 $S_2$ は $I_{C0}$ を連続測定するために用いる。 $S_2$ の対数出力電圧を $V_T$ , 対数増幅器の-17 dB ( $(20+14)/2$ )相当の電圧を $V_B$ とする。いま図中のb点に $V_T$ ,  $V_B$ 及び振幅 $V_M$ の矩形波を加算して印加する。同図の下の静特性に対応して差動増幅器A-3と積分器A-4を用いた帰路回路が動作する。その結果a点とb点は同電位になり掃引グリッド電圧(c点)には,  $\Delta V$ の振幅の矩形波があらわれる。この測定器の応答速度は, その繰り返し周波数で決まる。実際にはA-4の積分器の時定数は $10^{-4}$  secで矩形波の繰り返しは30 Hzで行なった。

第9図は室内実験の一例である。密度 $10^5$ 個/cm<sup>3</sup>,  $T_i$ が約2000 Kのプラズマ中でRPA ( $v_0=0$ )の静特性上に第8図のb,c点の電位が各々オシログラフの縦軸, 横軸に印加され輝点として指示されている。この装置が図中の縦軸に印加された矩形波に応じて正確に静特性上の $\Delta V$ を測定していることがわかる。

この装置はロケットに搭載され, その動作が確認された。第10図は得られたデータの一例である。ここでエネルギー分析電圧 $V_C$ , コレクタ電流 $I_C$ は各々第8図のc,b点の電圧に対応する。また $I_{C0}$ に対する $V_T$ は掃引型RPAのイオン電流(図中 $I_{C1}$ )の飽和電流値を $S_2$ 電



第11図 AAをパラメータとした  $V_R$ - $I_c$  特性の理論計算結果

流としてサンプルホールドして用いた。この場合  $S_1$  の電流設定 ( $I_{c2}$  の矩形波レベル) が低いのは、 $S_1$  に3枚のグリッドを用いているための補正による。

$V_C$  が0.6秒周期の正弦波状の値に重畳してあらわれている理由は次のとおりである。

この実験で用いたRPAのうち  $S_1$  が他の目的のために、スピン軸より  $\theta_s (=30^\circ)$  傾けて取り付けられていた。従って  $S_1$  のセンサに対するアタックアングルAAは、スピン軸方向のセンサのアタックアングル  $\theta_a$  に対して1スピン(周期約0.6秒)毎に  $30^\circ + \theta_a$  から  $30^\circ - \theta_a$  まで変化することになる。第10図における  $\theta_a$  の値は  $25^\circ$  であった。(  $\theta_a$  はロケットの才差運動の周期で変化する。この場合約70秒であり、測定フレーム(約0.3秒)に対しては一定と見なせる。) 第11図は、 $V_R$ - $I_c$  特性のAAをパラメータとした理論計算結果である。ここでAAはロケット機軸より  $\theta_s$  傾けて取り付けられたRPAの法線とプラズマ流のなす角である。 $\theta_a$  はロケット機軸とプラズマ流のなす角である。いまAAが  $5^\circ$  から  $55^\circ$  まで変化すると、 $\Delta V$  の値は  $V_b - V_a$  から  $V_a - V_c$  まで変化する(図中  $\Delta V_{5^\circ}$ ,  $\Delta V_{55^\circ}$ )。従って第8図のC点の電位はスピンに伴う  $\Delta V$  の変化によってその直流レベルが変調を受けることになる。

このロケットの実験では、寸法等の制約によってスピン軸方向に2つのRPAを取り付けることはできなかったために実際の  $\Delta V$  の変化から  $T_i$  を毎秒30個の速度で連続測定することができなかったが、リアルタイムの  $T_i$  の測定装置の動作の確認を飛行体上で行なうことができた。

最近下部電離層においてイオン温度の層状構造の存在が議論されている。(Oyama et al., 1980) この測定装置はそのためにイオン温度の空間分解能を画期的に高める必要から開発した。高速でリアルタイム処理されたデータから局所的な  $T_i$  の変動検出が可能である。さらにこの方法は電圧掃引を行わないので、プローブ電極のよごれに起因する誤差(Oyama et al., 1975) を避けることができる特徴を持っている。

## 参 考 文 献

- Boyd, R. L. F., The collection of positive ions by a probe in an electrical discharge, Proc. Roy. Soc. London, A - 201, 329 - 347, 1950.
- Gringanz, K. I. and M. Kh. Zelikman, Measurement of the concentration of positive ions along the orbit of the artificial earth satellite, Uzpekh Fiz. Nauk., 63, 239 - 252, 1957.
- Hanson, W. B., and S. Sanatani, Meteoric ions above the F 2 peak, J. Geophys. Res., 75, 5503 - 5509, 1970.
- Hanson, W. B., D. R. Frame, and J. E. Midgley, Errors in retarding potential analyzers caused by nonuniformity of the grid-plane potential, J. Geophys. Res., 77, 1914 - 1922, 1972.
- Hanson, W. B., S. Sanatani, and P. R. Zuccaro, The Martian ionosphere as observed by the Viking retarding potential analyzers, J. Geophys. Res., 82, 4351 - 4363, 1977.
- Haug, R., M. Felden, and D. Schirman, The grid probe as an ionic diagnostic tool in cesium plasma, J. Appl. Phys., 39, 4501 - 4508, 1968.
- Ionov, N. I. and A. Ya. Tontegode, Plasma probe characteristics obtained with various types of probes in gas-discharge mercury and cesium plasmas, Soviet Phys.-Tech. Phys., 9, 279 - 283, 1964.
- Knudsen, W. C., Evaluation and demonstration of the use of retarding potential analyzers for measuring several ionospheric quantities, J. Geophys. Res., 71, 4669 - 4678, 1966.
- 南, 竹屋: 正イオン温度測定器の高速掃引に関する実験とその電離層観測への応用について, 電学論, A - 100, 253 - 258, 1980 a.
- 南, 堤, 竹屋, K - 9M - 67号機による正イオン温度観測結果, 東大宇宙研報告, 16, 1301 - 1326, 1980 b.
- 南, 竹屋, マルチグリッド型イオン温度プローブの測定精度について(イオンセンシティブプローブとの相互比較実験), 電学論, A - 101, 187 - 194, 1981.
- Minami, S., and Y. Takeya, Ion temperature determination in the ionosphere by retarding potential analyzer aboard sounding rocket, J. Geophys. Res., 87, 713 - 730, 1982.
- Oyama, K., and K. Hirao, Erroneous evaluation of electron and ion temperatures from a contaminated retarding potential trap, Planet. Space Sci., 23, 1309 - 1312, 1975 a.
- Oyama, K., K. Hirao, P. M. Banks, and P. R. Williamson, Is  $T_e$  equal  $T_n$  at the height of 100 to 120 km?, Planet Space Sci., 28, 207 - 211, 1980.
- Patterson, J. N. L., Deduction of ionospheric parameter from retarding potential analyzers, J. Geophys. Res., 74, 4799 - 4801, 1969.
- Whipple, E. C. Jr., The ion-trap results in exploration of the upper atmosphere with the help of the third Soviet Sputmik, Proc. IRE, 47, 2023 - 2024, 1959.