

K-9M-67号機による正イオン温度観測結果*

南 繁行**・堤 四郎**・竹屋 芳夫**

An Experimental Result of Positive Ion Temperature
Observation on Board K-9M-67 Sounding Rocket
By

Shigeyuki MINAMI, Shiro TSUTSUMI and Yoshio TAKEYA

Abstract: A vertical profile of the ion temperature in the ionosphere at local afternoon in the region from 95 to 310 km has been measured directly by means of an improved retarding potential analyzer (R.P.A.) system aboard a space sounding rocket. This rocket was launched at Kagoshima Space Center of Japan (Geomag. Lat: $198^{\circ}4'E$, Long: $20^{\circ}0'N$). In this paper the method of measurement of the ion temperature by two R.P.A. and the experimental results are discussed.

Two R.P.A.'s were flown. One of them measured the probe characteristics and the other one measured the attack angle of the plasma. To measure the attack angle, this R.P.A. was tilted at 30° from the rocket spin axis.

The distortion or hysteresis properties of probe curve was not appeared which oftenly caused at the probe experiment aboard the rocket, since the clean surfaces of mesh grids and other electrodes are stored in the white room or the nose cone containing the dry N_2 gas.

The attack angle is measured directly by tilted ion trap. The measured attack angle data agree with the data obtained by geomagnetic and solar aspect meter aboard this rocket. It was found that this tilted probe was useful in the night time experiment. The results show that the overall ion temperature below 150 km expected to be the same as that of the neutral temperature at high solar activity. Above 160 km the average ion temperature shows the higher temperature gradually. In this region ion temperature profile contains wave like structure. The peak to trough amplitude of the temperature variation is about $250^{\circ}K$ and the wave length of about 25 km is determined. The wave like temperature variation is examined and compared with the consideration by Knudsen et al related to the source of the internal gravity wave.

* 宇宙研特別事業費による研究論文

** 大阪市立大学

緒 言

この論文では、電離層の正イオン温度の垂直構造を知るために搭載された観測器と得られた観測結果について述べる。

E層大気の熱構造の観測は、超高層の物理的解明に重要な項目の1つであるが、いままでとくに下部電離層における大気の温度分布についての観測はきわめてとぼしかった。大気の動的な構造の解明には、短時間で垂直構造の瞬時値が得られるロケットによる観測がきわめて有効である。この領域ではイオンと中性大気の温度がほぼ等しいため、スケールハイトから導かれる静的な中性大気温度モデルとの関連性を調べることができる。この目的にそった正イオン温度の観測はすでに10数年にわたって実施されて来た。そのうち、飛翔体の速度を利用してイオンのエネルギー分析を行う逆電位アナライザ (Retarding Potential Analyzer R.P.A.) によるKnudsen氏 [1], Hanson氏 [2] の実験ではいくつかの問題点が示された。そのうちアタックアングルの不確定さによる解析誤差をさけるため凹面半球形や球形のR.P.A. [3] が採用された。しかし、グリッドの粗さによる等電位面不均一について論じたHanson氏 [4], Goldan氏 [5], Troy氏 [6] の効果は避けられない。また、表面汚れに起因する特性の歪みの発生が避けられなかった。その後の衛星による正イオン温度の長期にわたる観測では、いろいろな工夫により温度分布のマッピングや層状構造の発見あるいは質量遷移高度の測定等に多大の成果をおさめつつある [7] ~ [15]。しかし、高度150 Km以下ではほとんど観測ができないことや、空間分解能と時間分解能の同時不確定の要素を多分にもつため、特に垂直構造に関する動的な温度分布の観測はロケットによらざるをえない。このような領域では他に、グレネード法 [16], ピトー管法 [17], フォーリングフェア法 [18] や中性大気温度のNaガス放出による検出等があり、特に100 Km以下では改良により今後共行われよう。著者らは、E層下部からF層に至るイオン温度の垂直構造をロケットにより直接測定すべく、新たに改良したR.P.A. システムを搭載して実験を行ったのでここに報告する。

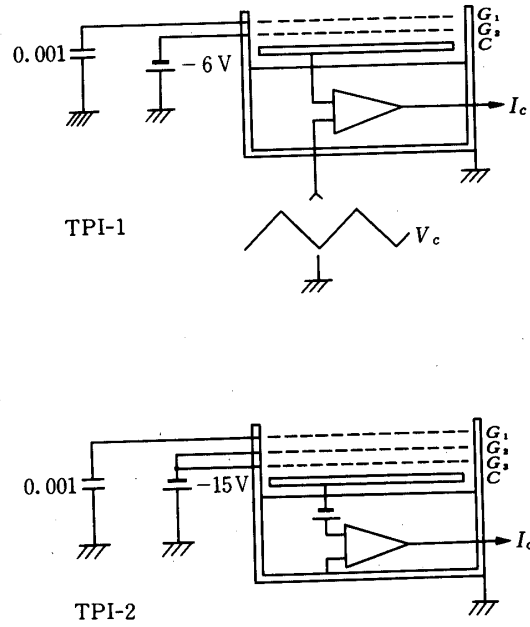
測定方法

搭載したセンサは、第1図に示すような2枚及び3枚メッシュグリッドをもつ2つのR.P.A. である。TPI-1はコレクタ掃引によるエネルギー分析型のもので、第1グリッド G_1 はフローティング電位にある。TPI-2は、第2図に示したようにロケット機軸より 30° 傾けて取付けられている。このセンサは主として掃引を行わず、図に示すような電位を各グリッドに印加して、コレクタにおいてR.P.A. の飽和イオン電流を測定する。R.P.A. で得られるコレクタ電流 I_c は、エネルギー分析電圧を V_R として次の式で与えられる。

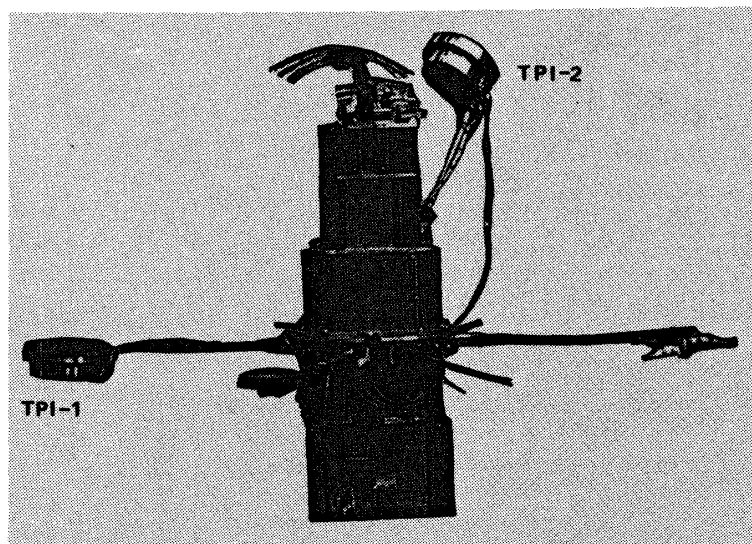
$$I_c = eNS\eta \int_{V_R}^{\infty} v \cdot f(v) dv \quad (1)$$

ここで $f(v)$ は速度を v とした正イオンの分布関数である。

いま、平板グリッドに対しイオン温度 T_i をもつマックスウェル分布したプラズマが相対的にバルク速度 v_R (この場合ロケット速度になる) で角度 θ_a をもって入射する場合、式(1)の積分結果は次式のようなになる [付録参照]。



第1図 搭載R.P.A.センサーの電圧印加方法



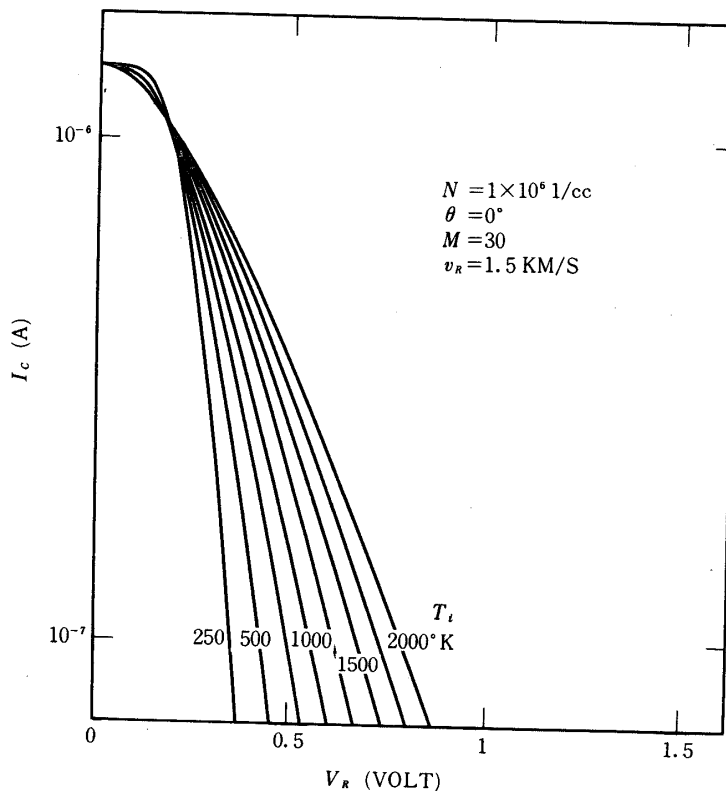
第2図 センサーのロケット上への取付図

$$I_c = eNS\eta \left\{ \frac{v_R \cos \theta_a}{2} (1 + \operatorname{erf} \cdot x) + \sqrt{\frac{\kappa T_i}{2\pi m}} e^{-x^2} \right\} \quad (2)$$

ここで

$$x = \sqrt{\frac{m}{2\kappa T_i}} \left(v_R \cos \theta_a - \sqrt{\frac{2e}{m}} \cdot \sec^2 \theta_a \cdot V_R \right) \quad (3)$$

である。また e は電気素量, N はプラズマ密度, S はコレクタ有効面積, η はグリッド透過率, K はボルツマン定数, m はイオン質量である。式 (2) の数値計算の例をプラズマ密度 1×10^6 [1/cc] の場合につき, このセンサー寸法で η を 1 とし T_i をパラメータとして第3図に示した。この図からもわかるように, V_R がゼロの時の電流 I_c はイオン温度に依存しないことがわかる。この性質は実際のイオンの相対質量 M が 16 から 30 の範囲において, ロケット速度 v_R が 500 m/s 以上ある飛翔中全期間温度 100°K から 2000°K まで保たれている。このことを利用して, あとで示すように飽和イオン電流 I_0 と v_R , M 及び θ_a を与えることによって, N が決定できる。つぎに式 (2) の特性を θ_a (センサーが機軸方

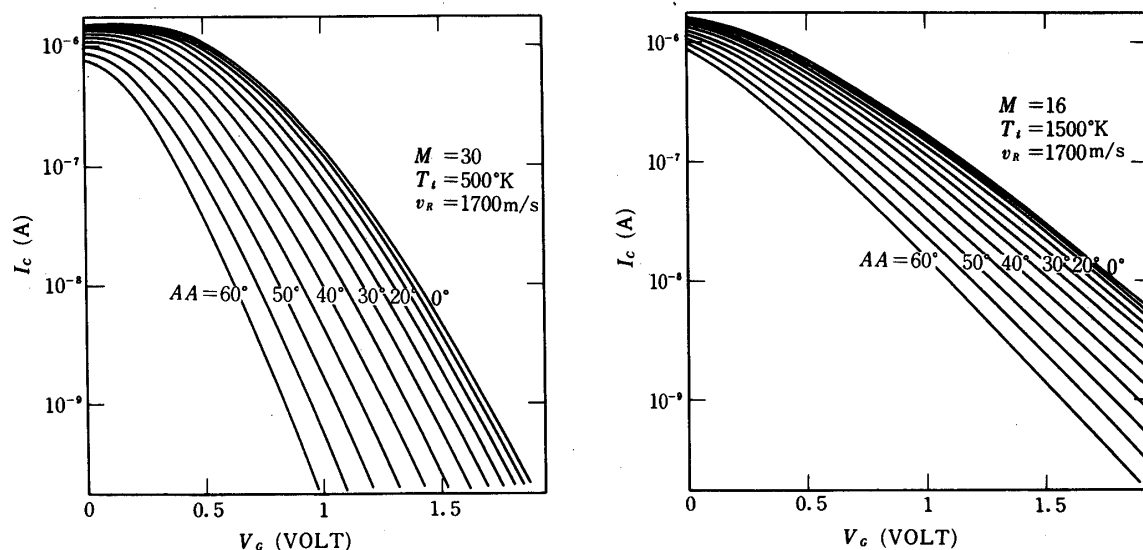


第3図 イオン温度をパラメータとしたイオン電流特性の数値計算例

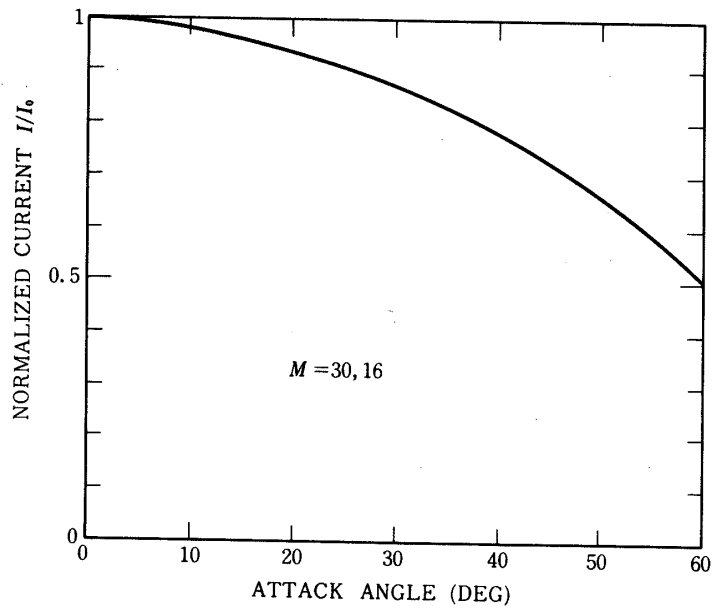
向にあるのでアタックアングル AA に同じ) をパラメータとして数値計算した結果を第4図に示す. この図から特徴的なことは, ロケット速度 v_R が等しければ, イオン質量 M , イオン温度 T_i に無関係に I_0 が決定されることである. すなわち I_0 は θ_a と v_R によって決まる. 第5図に θ_a がゼロの時の $I_c (=I_0)$ に対して θ_a を変えた時の電流の減少率を示した. いま第6図に示すようにロケット機軸よりセット角 θ_s だけ傾けて取付けられた R.P.A. (この場合 TP1-2) があれば, いま機軸に対し θ_a の角度をもってプラズマが入射すると, (実際にはロケットの速度ベクトルと機軸ベクトルのなす角) ロケットの1スピン周期の間にセンサー法線ベクトルとプラズマ流のなす角 θ は $\theta_s \pm \theta_a$ だけ必ず変化する. いま第4図を利用してセット角 θ_s を 30° とした場合, θ_a が変化することによる I_0 の最大値 I_{Max} と最少値 I_{Min} の比は, 第7図のように変化する. 従って1スピン中の TP1-2 の捕集コレクタ電流の最大値と最少値の比を求めることにより, アタックアングル即ち TP1-1 の θ_a が直接求まることになる. これは, 絶対姿勢を求められない夜間あるいは極域での実験においてその威力を発揮する.

観測器

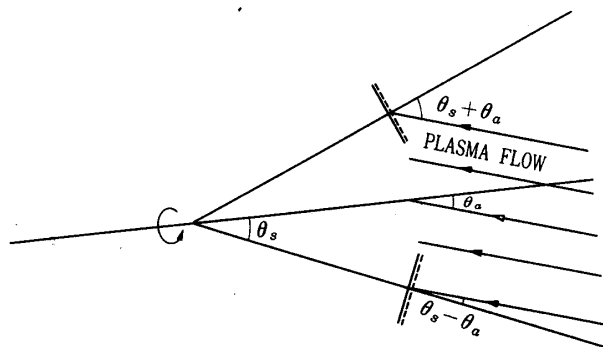
K-9M-67号機に搭載された機器の諸元を第1表に示す. このセンサは先に述べたアタックアングルの測定を可能にしたほかに, メッシュグリッドの等電位性とプロローナの汚れの低減に考慮を払ってある. 即ちセンサの製作にあたっては, 銅の真空蒸着法で製作された薄膜状のメッシュグリッドをホワイトルーム中で組込み, その後窒素ガス中に保管する方法を用いた. さらに本組後ノーズコーン内に乾燥窒素ガスを絶えず流すことにより, 電極の汚染を防止した. この結果は十分に好結果をもたらした. また, このグリッドは1000メッシュ/インチ厚さ3マイクロンで, グリッドの等電位性に起因する効果 [5] [6] も低減させた. また, このセンサは全く別なイオン温度測定法であるイオンセンシティブプロ



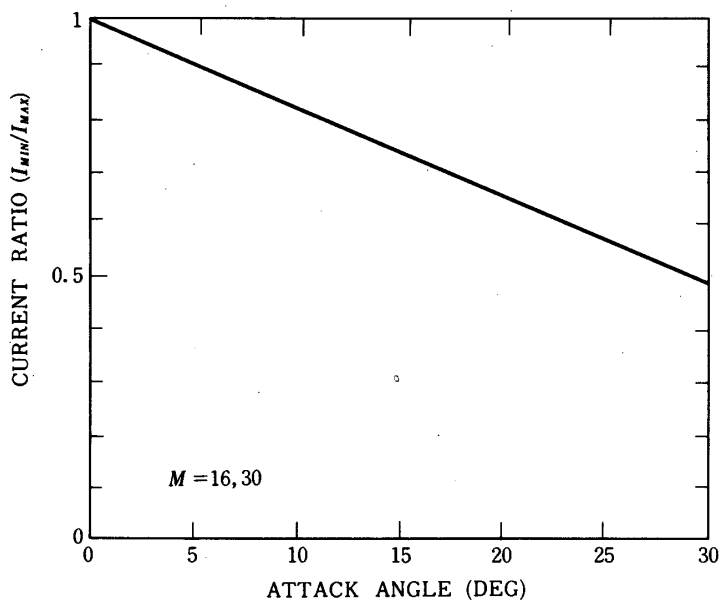
第4図 アタックアングル AA をパラメータとしたイオン電流特性



第5図 アタックアングルを変えた時のコレクタ飽和イオン電流の正規化した値の理論計算結果



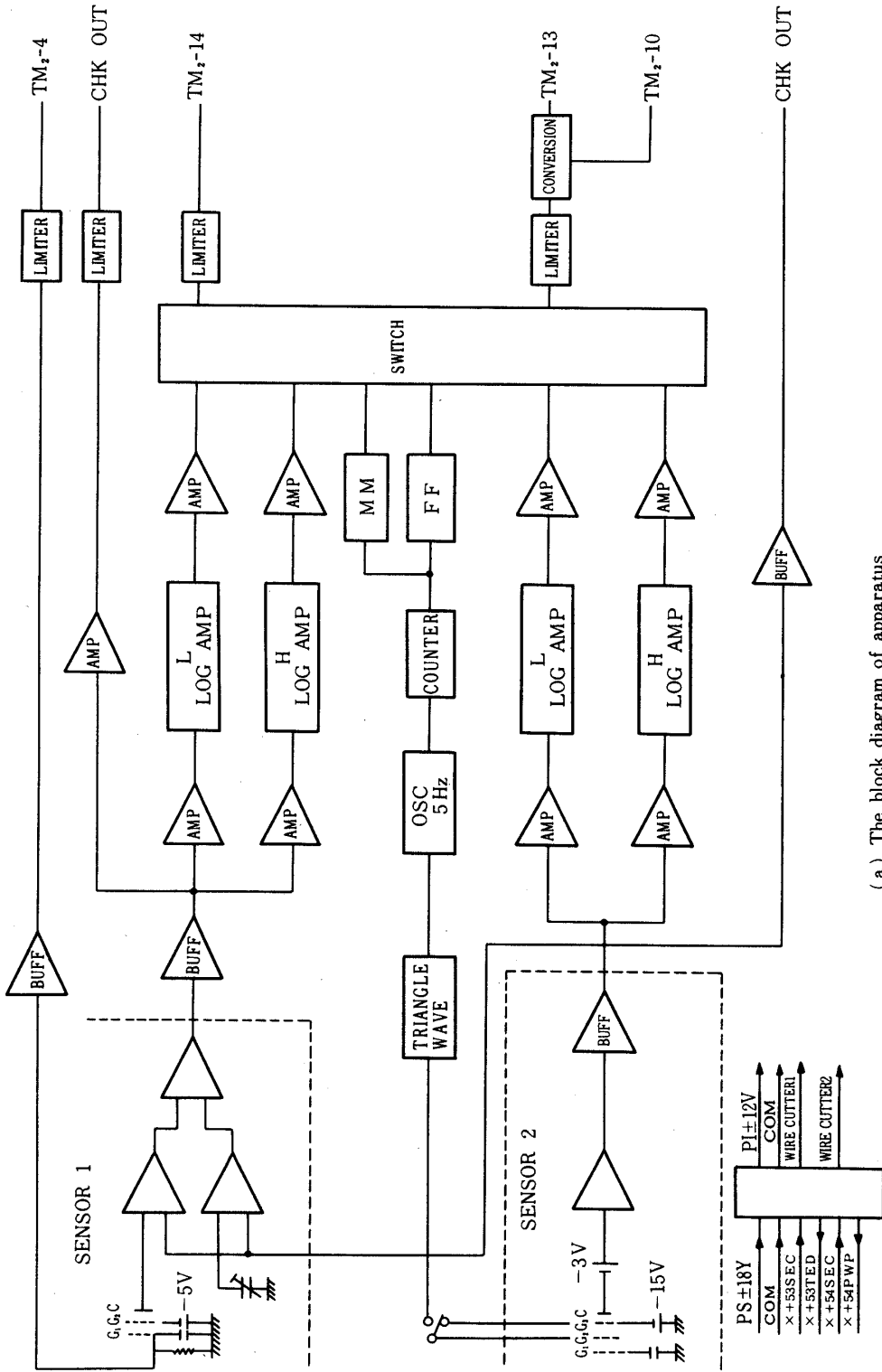
第6図 傾けたプローブにて θ_a を測定する方法の様式図



第7図 アタックアングルを変えた時のイオン電流の変化率の計算図表 ($\theta_s = 30^\circ$)

第1表 センサー諸元

		SENSOR 1 (TPI-1)	SENSOR 2 (TPI-2)
SETTING		SENSOR NORMAL	SENSOR 30°
SENSOR		PLANE GRID	PLANE 3 GRIDS
SWEEPING		COLLECTOR	GRID/FIX
SWEEP RATE		10 V/sec	10 V/sec
DETECT CURRENT		$3 \times 10^{-10} \sim 3 \times 10^{-5}$ A	$3 \times 10^{-10} \sim 3 \times 10^{-5}$ A
COLLECTOR		86 mm ϕ	86 mm ϕ
GRID	G ₁	FLOATING	FLOATING
	G ₂	-6 V	SWEEP / -15 V
	G ₃		-15 V
COLLECTOR C		SWEEP	-3 V
MESH		1000メッシュ/インチ2 μ 厚	1000メッシュ/インチ2 μ 厚
GRID DISTANCE		4 mm	4 mm
ATTACK ANGLE			30-Hz AC MOD/FIX

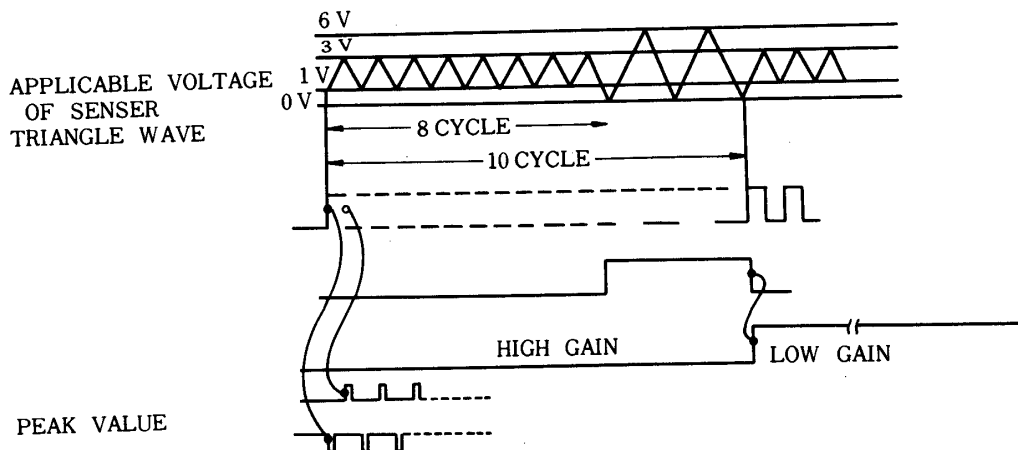


(a) The block diagram of apparatus

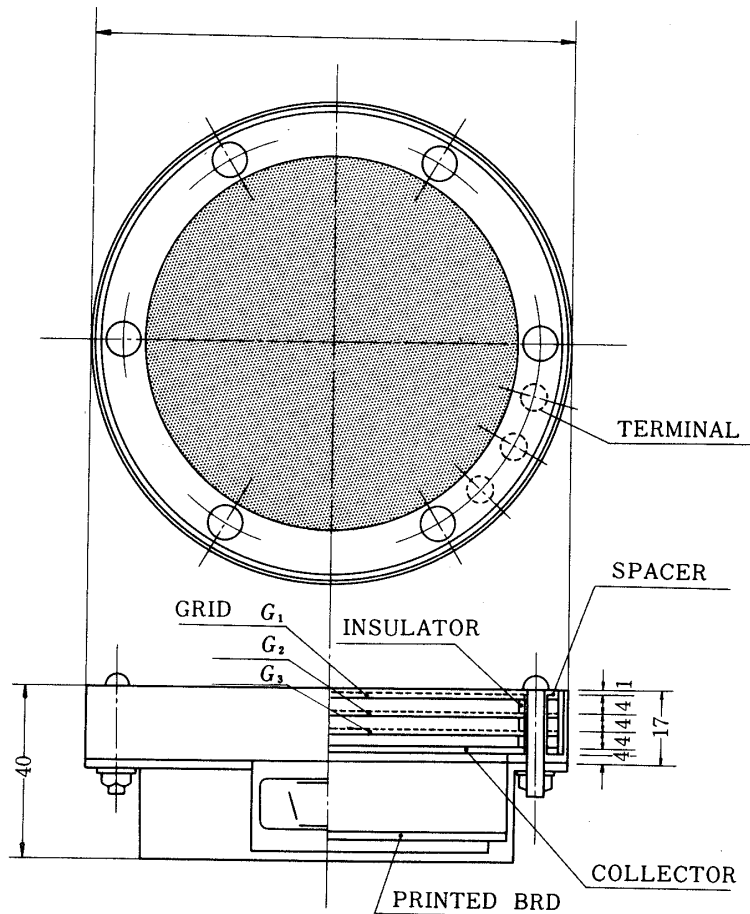
第 8 図 装置のブロック図

ブ [20] との相互比較を地上試験として行い、その精度の確認を行った [22]。この機器の電氣的なブロック図を第8図に示す。第9図にエネルギー分析に使用した掃引電圧の波形を示す。電圧の掃引率は常に約 10 V/sec と一定で、小さい振幅の掃引周期は約 0.3 秒である。TPI-2 は通常 θ_a 計測のために第2グリッド、第3グリッドはともに -15 V に固定されている。第10図に R. P. A. センサー (TPI-2) の寸法と形状を示す第11図は装置の写真である。

観測結果 この正イオン温度測定器は、昭和55年8月18日16時00分JSTに鹿児島宇宙空間観測所より K-9M-67号機に搭載されて打上げられた。この時の太陽天頂角は 53° であった。この機は発射後51秒高度74.5 kmで開頭が行われ、第12図に示す軌跡を飛行した。正イオン温度測定器は発射後250秒で他のPIとテレメータ切換をしたので、結果は上昇時のこの高度までである。得られた結果の一部を第13図に示す。ここで I_c は、TPI-1によるRPA特性である。 V_R は第9図に示したのと同じ掃引三角波で10周期毎(約3秒毎)にゲイン切換が行なわれた。 I_{c2} は、TPI-2による θ_a 測定のための捕集電流特性である。この電流の最大、最少値の比を用いて第7図からアタックアングルが求まる。得られた結果を第14図に示した。プリセッションの半頂角は約 24° で周期は約70秒である。図中丸印は基本計器部の地磁気姿勢計(GA)と太陽センサ(SVS)による絶対姿勢データと、軌跡から求めた速度ベクトルの両者から計算により求めた値である。両者はよく一致している。第15図には、TPI-2にも掃引電圧 V_{G2} を印加した時のデータを高度約150 km付近で示したものである。1番上の図の I_c は飽和電流がスピン(約1.8 Hz)の影響を受けずほぼ一定値を示し、しかもウェイク等の影響を受けていないことを示している。ちなみにこの時のアタックアングルは約 28° と最大であり、第2図のように機軸から横に出ているTPI-1としては最も条件が悪かった場合に相当するが、この場合でもウェイクの影響が表われ



第9図 掃引電圧の波形

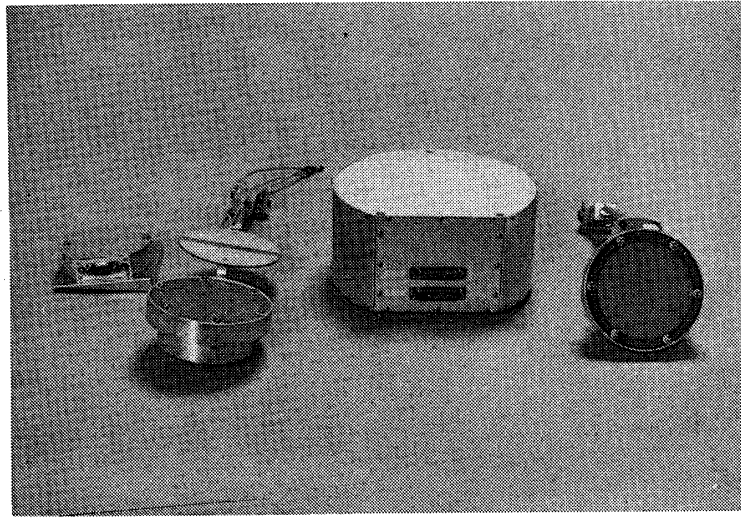


第10図 TPI-2の形状と寸法

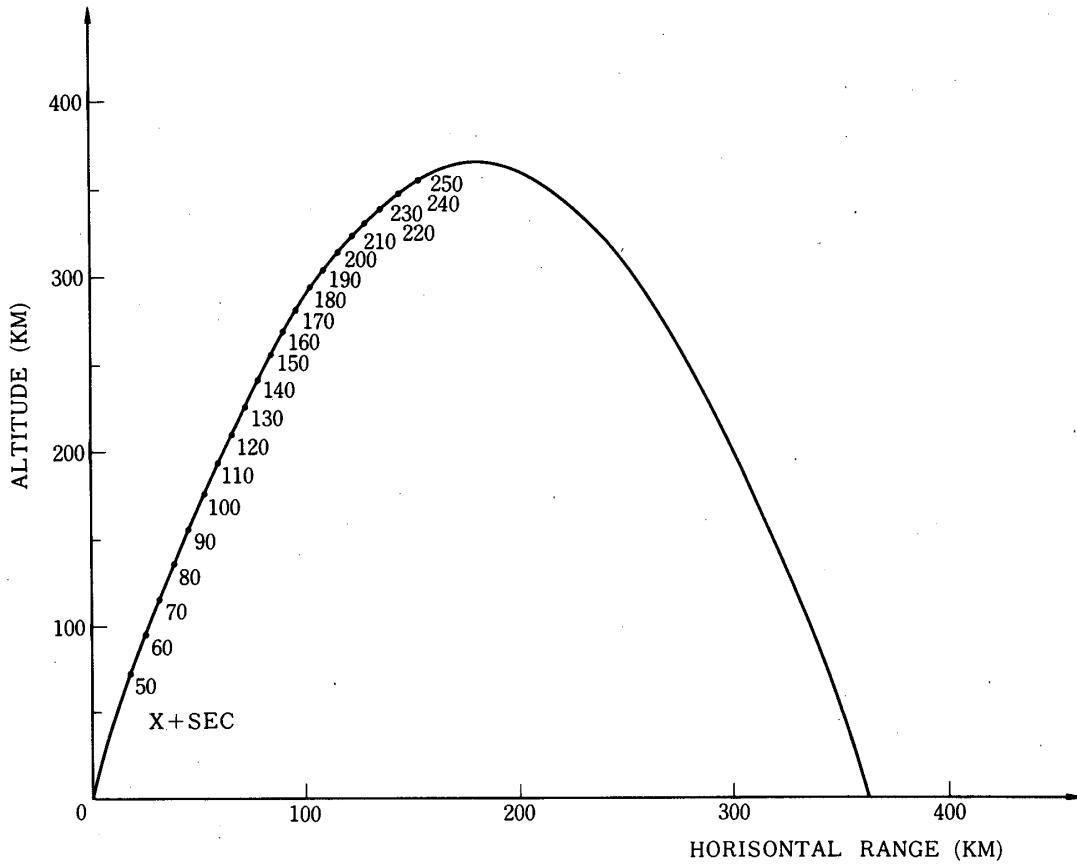
ず正常な観測が行われたことを示している。なお、上から3番目のTPI-2によるコレクタ電流 I_{c2} は短周期でのイオン温度変化を検出するために測定したが、今回はこの動作結果については省略する。第15図におけるTPI-1の電流 I_c を拡大したのが第16図である。この図から、TPI-1のセンサーの電流波形が掃引電圧の上昇時と下昇時で全く差異が認められないことが明らかである。このように全飛行時において、プローブ特性の歪すなわちヒステリシスがないR. P. A. 特性を取得することができた。

データ解析

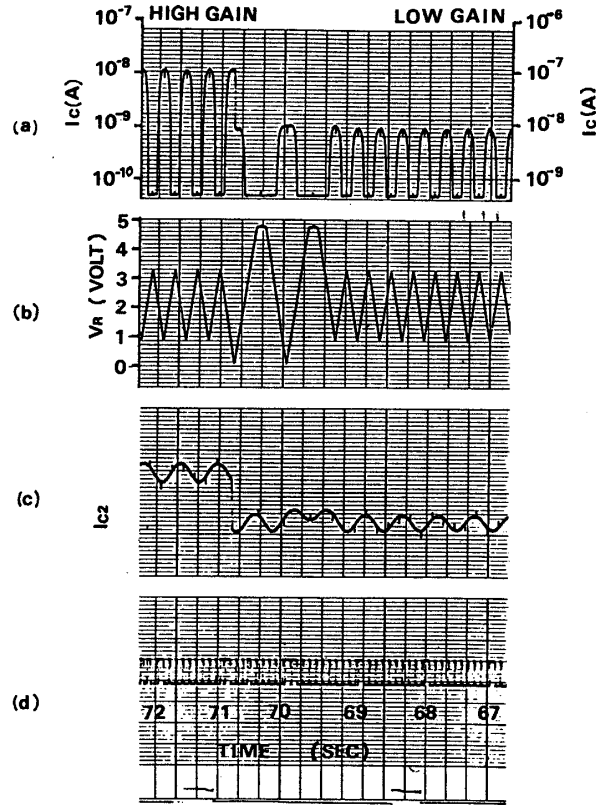
実際のデータ解析は、今回アナログテレメータを使用したことと、計算機処理の必要性から、第17図のように、TPI-1の電流特性を電磁オシロペーパーに描かせてペンシルフォロアーによる12ビットのAD変換によってデジタル化した。第5図の手法を計算機で行う



第11図 K-9M-67号機搭載正イオン温度測定器の写真



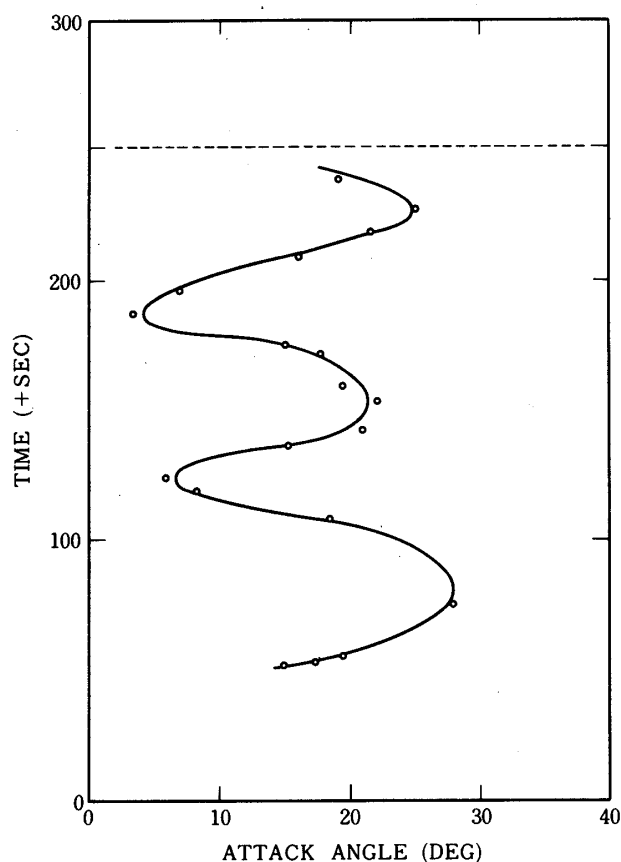
第12図 K-9M-67号機軌跡と発射後の秒時(TPIは250秒で他のPIと切換えられた)



第13図 得られた結果の1例. 高度110 Km付近

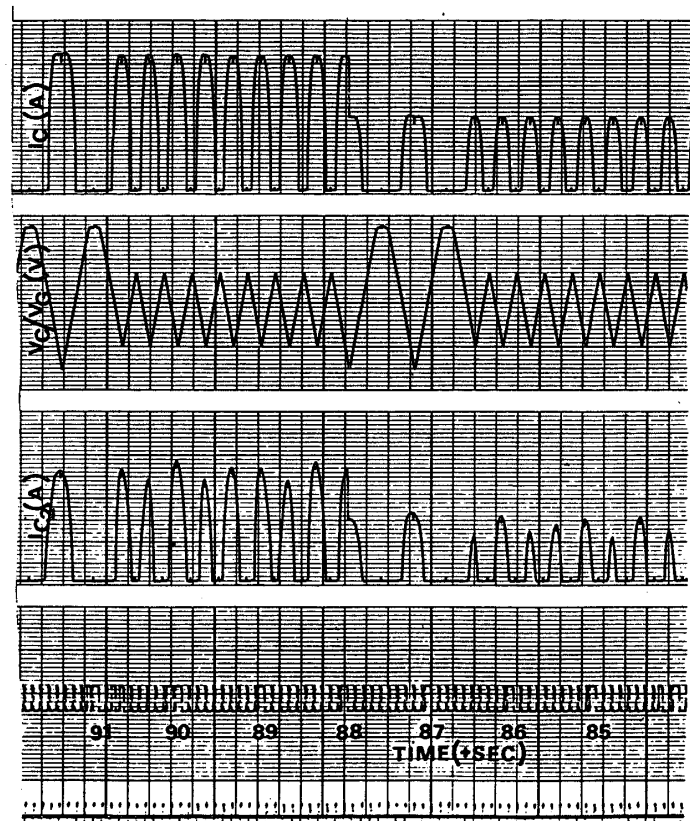
事により, プラズマ密度の決定をした. つぎに, イオン温度を決定するに際して問題となるのはイオンの質量である. ロケットによる観測では, ロケット速度が小さいため, バルクのイオンエネルギーがイオン温度ほど大きくなる. 従って, 衛星のように質量の分離測定は不可能に近い. しかし, E層からF層における主要イオンとして, Mが30付近のNO, O₂とMが16のOイオンが卓越している. 通常その遷移高度は160 km 付近にあると言われている [24]. ここでは先ずMを30, 16の単一イオンと仮定して, 全高度で T_i を解析した. v_R, θ_a, N, M がわかると, 1フレームのデータにつき, 第18図のフローチャートに示すような計算手順で T_i が決定される. これは, 得られた測定カーブに対する理論式の最適フィットによる方法に属するが, 従来の方法 [25] に比べ, 解析法を簡素化してある. 最適フィットにおける誤差 G はサンプルした掃引電圧を $V(i)$ とし, 測定電流及び理論電流を各々 $J(V(i)), I(V(i))$ として

$$G = \sum_{i=1}^n \{ \log_{10} J(V(i)) - \log_{10} I(V(i)) \}^2 \quad (4)$$



第14図 得られたアタックアングルの解析結果

と表わし、 G が最少になった時のパラメータを求める。なお、最適値前後の分解ステップは温度 10°K 、プラズマ電位 V_s が約 0.02 V である。得られた結果はプラズマ密度については第19図に、イオン温度については第20図に示す。プラズマ電位 V_s の高度分布が第21図のように得られた。ところで第22図は、TP1-1の第1グリッドのロケット電位に対するフローティング電位の差 V_f を示したものである。これは本来ロケット壁材とメッシュの接触電位だけで決まるはずであり、事実約 1.0 V の一定値が得られている。しかし V_f は光電子放出や粒子ビームによる帯電等や各々の金属の向き、幾可学的形状によって変わるはずである。このデータは、第14図のプリセッションの周期と関連をもたず一定な V_f を示していることから、この様な効果は存在していなかったと考えてよい。この事実から推論して、ロケットの電位もほぼ一定値を示すと考えられる。第21図は、高度 150 km から 180 km で V_s の急激な減少が M が 30 及び 16 の両曲線にみられる。そこで下部での $M=30$ とした時の V_s 値と上層での $M=16$ とした時の V_s 値を各々点線の様に結び、これを V_s 値として外挿した。第15図の太線高度 150 km から 200 km での T_i 値は、この V_s を既知とし、逆に質量 M を未知として T_i を決定した値である。



第 15 図 高度 150 Km 付近の R.P.A.s の測定データ

考 察

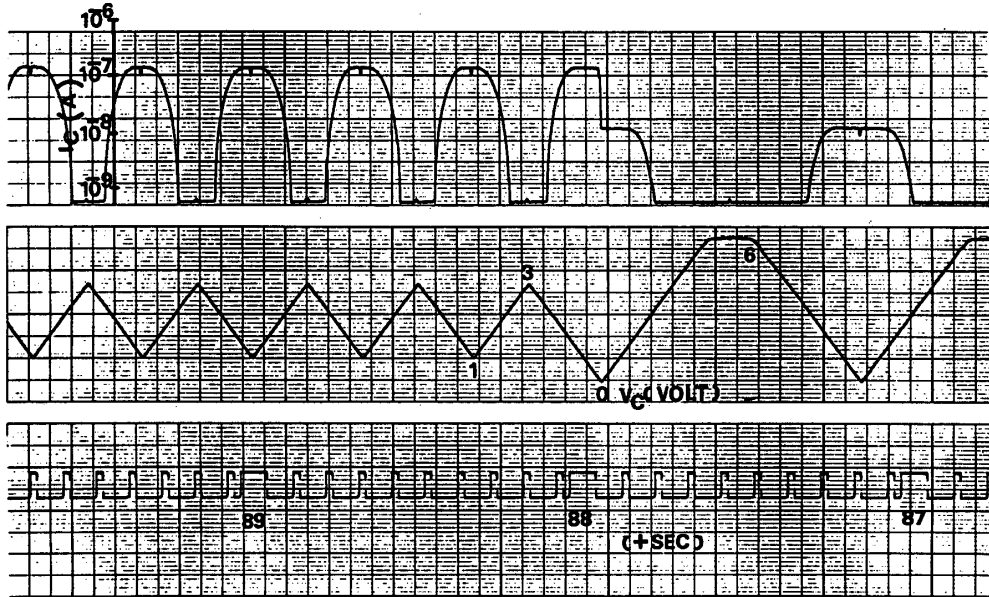
得られた結果について考察する。イオン温度の垂直高度分布とともに 2 つの中性大気モデルを描いたのが第 23 図である。ここで Nicolet 氏のモデル [26] は外気圏温度 T_{∞} として 1155°K を用い、Jacchia 氏のモデル [27] には 3 太陽周期及び当日の 2.8GH_2 太陽フラックス $\bar{F}_{10.7}$ と $F_{10.7}$ 各々 179.5 と 176.5 を用い地方時 16 時におけるプロファイルとして示したものである。夜間最小温度と外気圏温度は各々 850°K と 1215°K となった。また、東京大学平尾研究室の電子温度プローブによる結果も同時にプロットさせて頂いた。この図から得られる特徴は次のようになる。

①全体に波長 20 Km 付近の層状の温度変化がみられ、特に高度とともにその振幅が増大している。同図のようにアタックアングル θ_a とは相関がない。

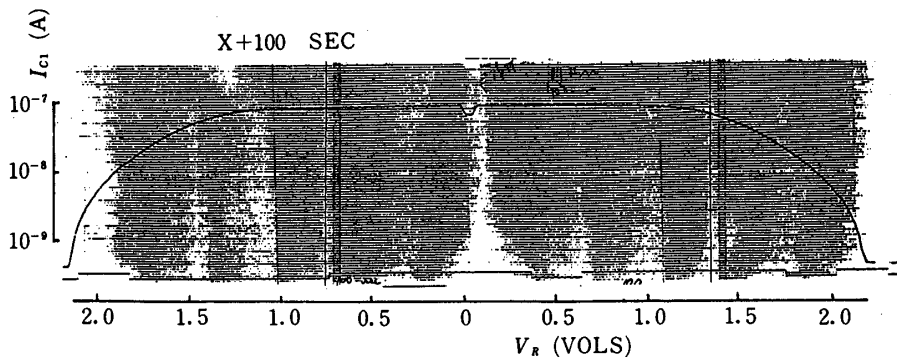
②平均値としてのイオン温度分布は中性大気モデルとよく一致し、モデルに近い代表的な測定結果とみなせる。

③高度 110 Km 以下で下層に向かって温度の上昇する傾向がみられる。

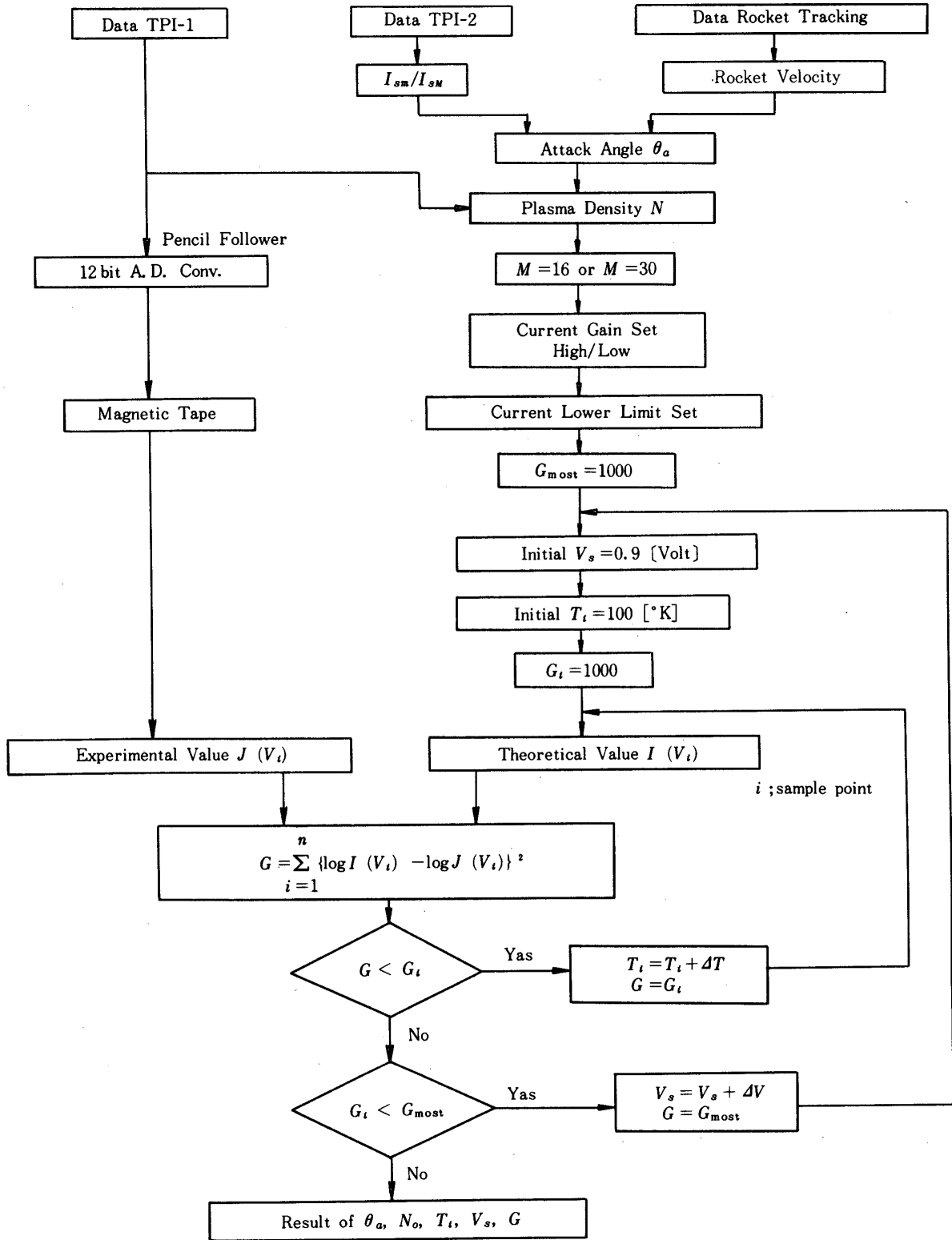
このような 3 つの点につき検討を加える。まず①については電子温度 T_e の分布にも同様の波長のものがみられ、これはある種の大気波動の励起による擾乱の可能性が強い。なお、



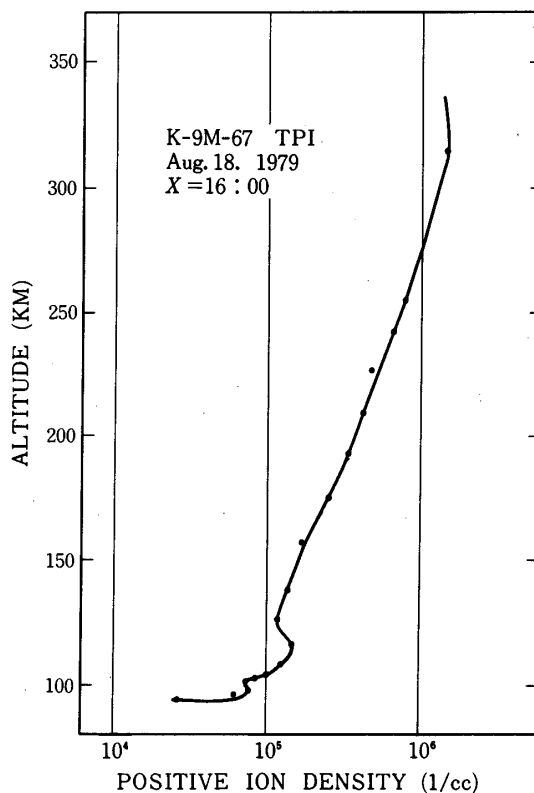
第16図 TPI-1の特性. ヒステリシス歪のないことに注目



第17図 電磁オシロペーパー上のTPI-1の電流電圧特性 (高度約150 Km)



第 18 図 データの計算機処理のフロー図



第19図 プラズマ密度の解析結果

当日の内の浦局のアイオノグラムは30秒おきの第24図のような観測例において3分周期の振動があらわれている(第25図)。また、国内3観測所での f_oF の時間変化にも第26図のような80分周期の振動がある。これらのはかってKnudsen氏が観測した第27図の結果[28]と類似性があるが、この方面の検討は大気波動観測例[23]も考慮して更に検討したい。

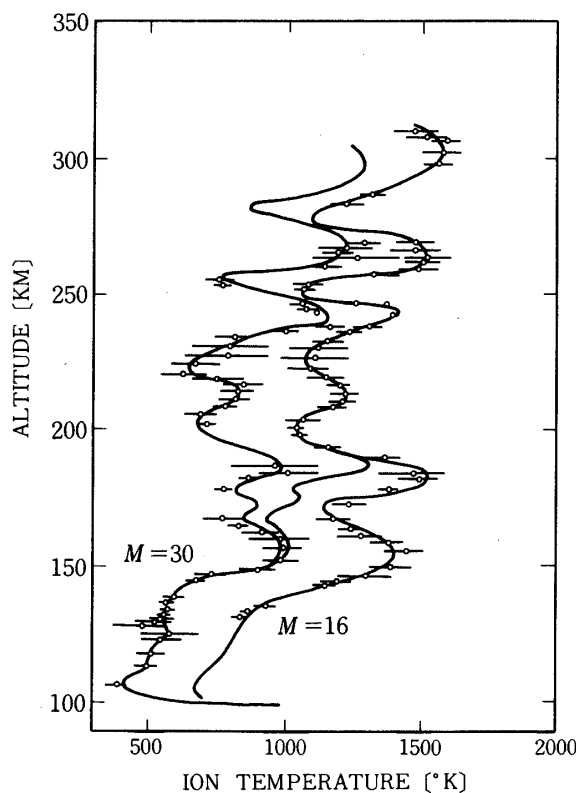
②については T_e の平均値とあわせると、150 Km付近と300 Km付近で T_i と T_e が一致するという赤道型の温度構造をもっていたことが確かめられた[29]。

③については空力加熱による効果[28]なのか、この領域が高温であったのか未だ検討中である。

結 言

これまでロケット実験では信頼できるイオン温度観測が実施できなかったが、今回いくつかの工夫と配慮を行うことによっていくつかの新しい結果を含む多くの成果を上げることができた。これは将来のこの方面の観測への足がかりとなると思われる。

なお、このロケット実験は東大宇宙研の実験プロジェクトチームの絶大なるご協力ご援助のもとに実行できたものであり、実験主任平尾邦雄教授にはとりわけ深く感謝致します。ま



第20図 正イオン温度の解析結果

た、電子温度のデータを快よく提供して頂いた平尾研小山氏に厚く御礼申し上げます。

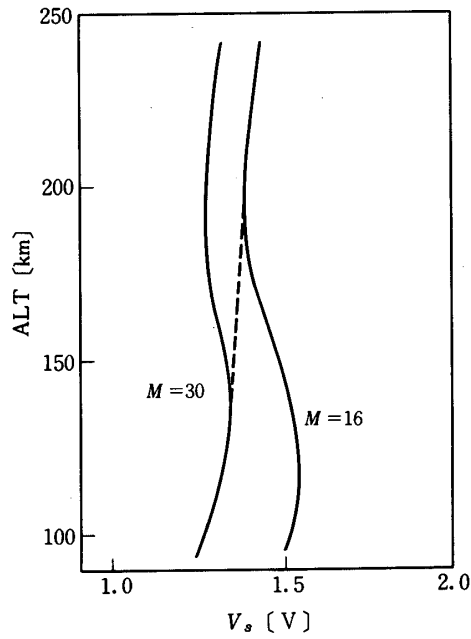
なお、このセンサーのメッシュ入手は(株)大日本スクリーンのご厚意によるものである。搭載機器の製作については、(株)松栄電子の堀江氏、宇都氏のご努力によるところが大きい。

付録・式(2)の導出について

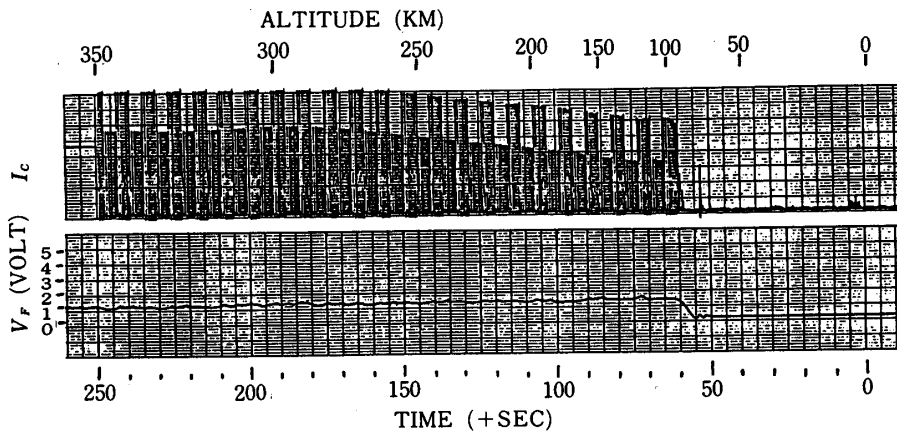
捕集コレクタ電流 I_c は、エネルギー分析電圧を V_R として式(1)に示される。いま、粒子の速度ベクトルを第28図の座標系で X, Y, Z 3成分に分解すると、速度分布関数は次式で示される。

$$f(v_x, v_y, v_z) = \beta \exp[-\alpha\{(v_y - v_R \cos \theta)^2 + (v_x - v_R \sin \theta)^2 + v_z^2\}] \quad (\text{A-1})$$

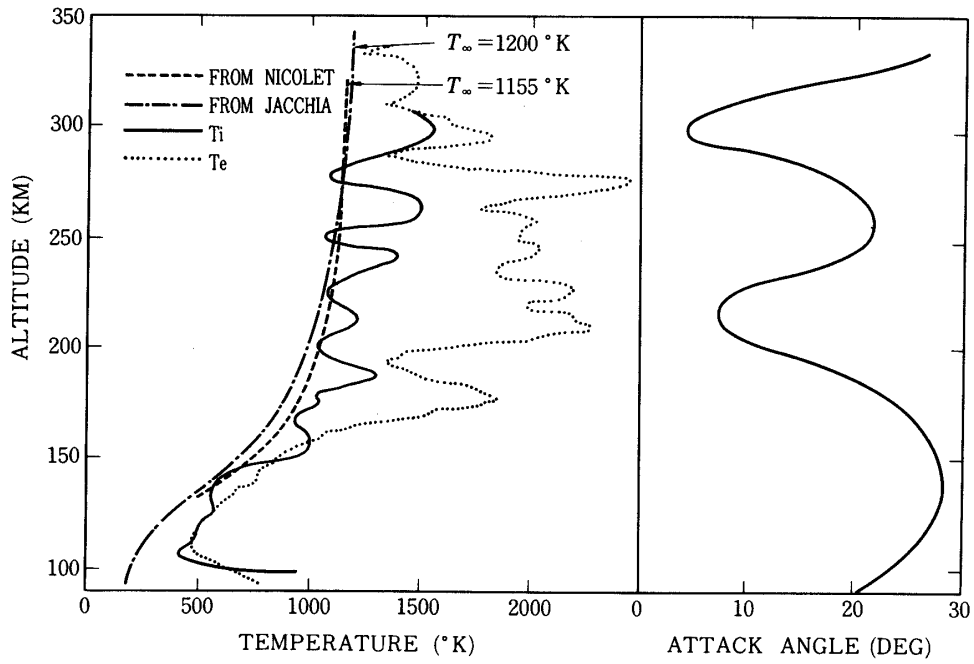
ここで YZ 平面にプローブ面があるとし、 Y に垂直な X 軸から Y 方向に θ_a の角度をもってプラズマがロケット速度 v_R のバルク速度で入射したとする。また、



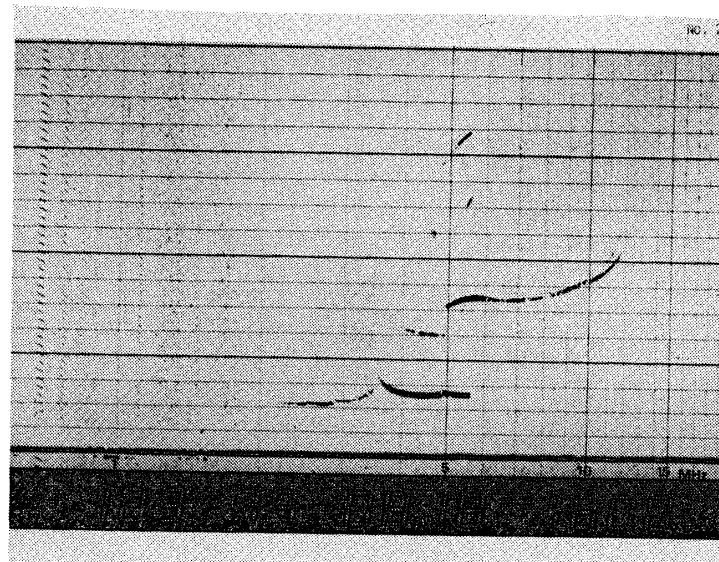
第21図 プラズマ電位 V_s の解析結果



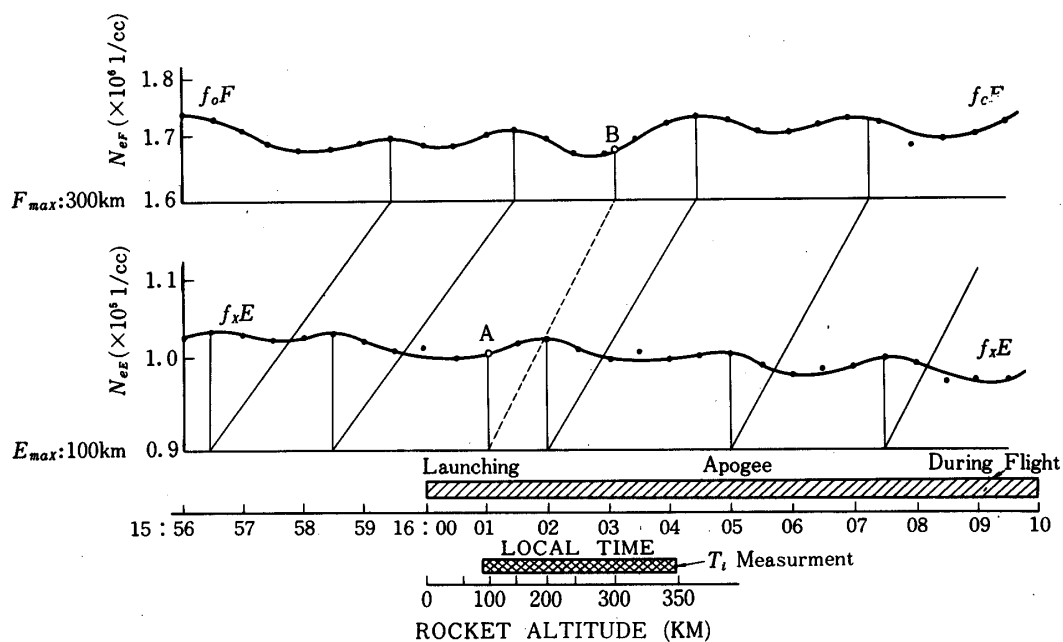
第22図 フライト中のフローティング電位 V_f の変化.
 I_c はTPI-1の電流値の変化(利得切換が行われている)



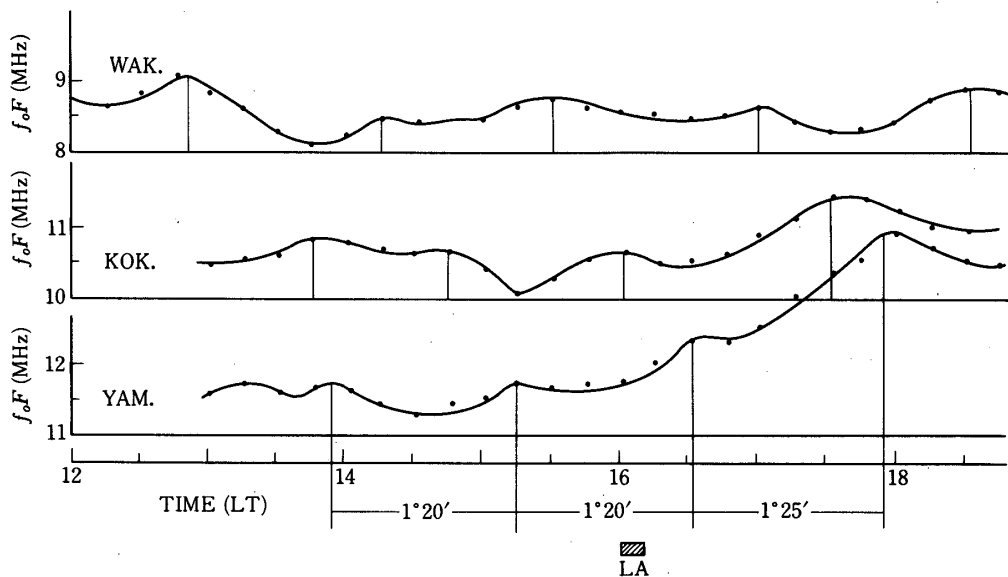
第 23 図 得られた温度測定結果と中性大気モデルの図。
 右図はアタックアングルを示している。 θ_a と T_i の波状構造とは相関がない。



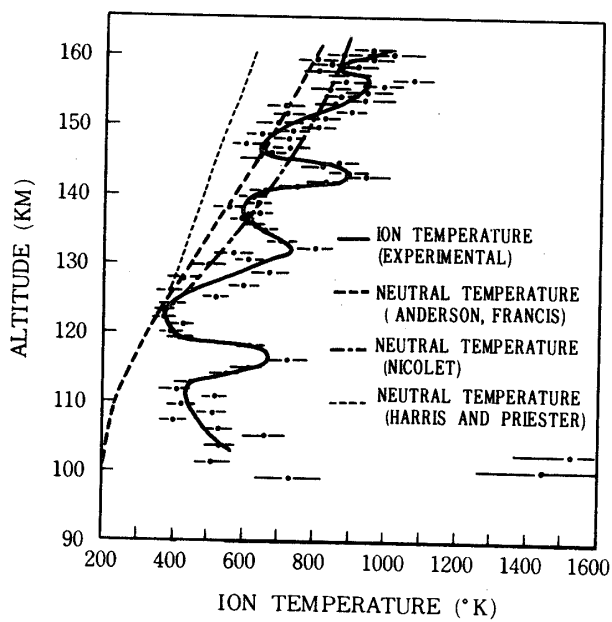
第 24 図 発射時の内之浦におけるアイオノグラム測定例



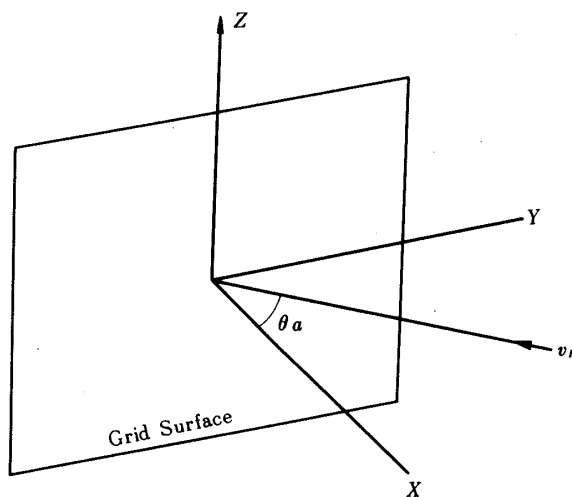
第25図 打上げ時の内之浦のアイオノグラムによるE, F層臨界密度の時間変化(図のA, B点はロケット通過を示す)



第26図 打上日の3観測所のアイオノグラムによるfoFの時間変化



第27図 Knudsen氏等の観測したE層イオン温度の層状分布の観測 [28] の結果



第28図 平面プローブと座標軸

$$\alpha = \frac{m}{2\kappa T_i} \quad (\text{A-2})$$

$$\beta = \left(\frac{m}{2\pi\kappa T_i} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (\text{A-3})$$

$$v_p = \frac{\kappa}{\sqrt{\alpha}} \quad (\text{A-4})$$

エネルギー分析電圧が V_R のときプローブ捕集電流 I_C は

$$I_C = eNS\eta \int_{V_R}^{\infty} v f(v) dv \quad (\text{A-5})$$

$$= eNS\eta \int_{v_V}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} v_x f dv_x dv_y dv_z \quad (\text{A-6})$$

ここで

$$\frac{1}{2} m (v_V \cos \theta_a)^2 = eV_R \quad (\text{A-7})$$

である。次に

$$I_1 = \int_{v_V}^{\infty} v_x \exp\{-\alpha(v_x - v_R \cos \theta_a)^2\} dv_x \quad (\text{A-8})$$

とし、

$$\sqrt{\alpha}(v_x - v_R \cos \theta_a) = t \quad (\text{A-9})$$

とおけば

$$\begin{aligned} I_1 &= \int_{\sqrt{\alpha}(v_V - v_R \cos \theta_a)}^{\infty} \left(\frac{1}{\sqrt{\alpha}} + v_R \cos \theta_a \right) \exp(-t^2) \frac{dt}{\sqrt{\alpha}} \\ &= \frac{1}{2\alpha} \exp\{-\alpha(v_V - v_R \cos \theta_a)^2\} + \frac{v_R \cos \theta_a \sqrt{\pi}}{\sqrt{\alpha}} \left[1 - \operatorname{erf} \right. \\ &\quad \left. \left\{ \sqrt{\alpha}(v_V - v_R \cos \theta_a) \right\} \right] \end{aligned} \quad (\text{A-10})$$

となる。また

$$I_2 = \int_{-\infty}^{\infty} \exp\{-\alpha(v_Y - v_R \sin \theta_a)^2\} dv_Y \quad (\text{A-11})$$

とおき

$$\sqrt{\alpha}(v_Y - v_R \sin \theta_a) = t \quad (\text{A-12})$$

とおけば

$$I_2 = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-t^2) \frac{dt}{\sqrt{\alpha}} = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-t^2) dt = \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \quad (\text{A-13})$$

さらに

$$I_3 = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-\alpha v_z^2) dv_z = \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \quad (\text{A-14})$$

以上より

$$\begin{aligned} I_C &= eNS\eta \left(\sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \right)^2 \beta \left[\frac{1}{2\alpha} \exp\{-\alpha(v_V - v_R \cos \theta_a)^2\} + \right. \\ &\quad \left. \frac{v_R \cos \theta_a}{\sqrt{\alpha}} \frac{\sqrt{\pi}}{2} \{1 - \operatorname{erf}(v_V - v_R \cos \theta_a)\} \right] \\ &= I_{i0} \left[\exp\left\{-\left(\frac{v_V - v_R \cos \theta_a}{v_P}\right)^2\right\} + \sqrt{\pi} \cdot \frac{v_R \cos \theta_a}{v_P} \right. \\ &\quad \left. \left\{1 - \operatorname{erf}\left(\frac{v_V - v_R \cos \theta_a}{v_P}\right)\right\} \right] = eNS\eta \left\{ \sqrt{\frac{\kappa T_i}{2\pi m}} \exp(-x^2) \right. \\ &\quad \left. + \sqrt{\frac{\kappa T_i}{2\pi m}} \cdot \pi \cdot \frac{m}{2KT_i} v_R \cos \theta_a (1 - \operatorname{erf}(-x)) \right\} \\ &= eNS\eta \left\{ \sqrt{\frac{\kappa T_i}{2\pi m}} \exp(-x^2) + \frac{v_R \cos \theta_a}{2} (1 + \operatorname{erf}(x)) \right\} \quad (\text{A-15}) \end{aligned}$$

が得られる。ただし

$$I_{i0} = eNS \sqrt{\frac{\kappa T_i}{2\pi m}} \quad (\text{A-16})$$

$$x = \sqrt{\frac{m}{2\kappa T_i}} \left(v_R \cos \theta_a - \sqrt{\frac{2e}{m}} \sec^2 \theta_a V_R \right) \quad (\text{A-17})$$

$$\operatorname{erf}(-x) = -\operatorname{erf}(x) \quad (\text{A-18})$$

である。式(A-15)が本文の式(2)に対応する理論式である。文中の他のパラメータの名称は本文中と同じである。

1980年10月20日

参考文献

- [1] Knudsen, W.C., and G.W. Sharp, Ion concentration and thermal analysis of data obtained from an ion trap carried in a low-altitude rocket, oral presentation at conference on Direct Aerodynamic Measurement in the lower Ionosphere, Univ. of Illinois, Oct. 1963.
- [2] Hanson, W.B., and D.D. Mckibbin; An ion trap measurement of the ion concentration profile above the F2 peak, *J. Geophys. Res.*, 66, 1667-1671, 1961.
- [3] Sagalyn, R.C., and M. Smiddy; Measurement and interpretation of ion density distributions in the daytime F region, *J. Geophys. Res.* 68, 199-211, 1963.
Nagy, A.F., L.H. Brace, C.R. Carignen, and M. Kanal; Direct measurement of the thermal nonequilibrium in the ionosphere, *J. Geophys. Res.* 68, 6401-6411, 1963.
- [4] 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.
- [5] Goldan P.D., E.J. Yadlowsky, and E.C. Whipple, Jr.; Erros in ion and electron temperature measurements due to grid plane potential nonuniformities in retarding potential analyzers, *J. Geophys. Res.* 78, 2907-2916, 1973.
- [6] Troy B.E., Jr., and E.J. Maier; Effect of grid transparency and finite collector size on determining ion temperature and density by retarding potential analyzer, *J. Geophys. Res.*, 80, 2236-2240, 1975.
- [7] Moss, S.J., and E. Hyman; Minimum variance technique for the analysis of ionospheric data acquired in satellite retarding potential analyzer experiments, *J. Geophys. Res.*, 73, 4315-4323, 1968.
- [8] Hanson, W.B., D.D. Mckibben, and G.W. Sharp; some ionospheric measurements with satellite borne ion traps, *J. Geophys. Res.*, 69, 2747, 1964.
- [9] Bourdeau, R.E., and J.L. Donley; Explorer 8 satellite measurements in the upper ionosphere, *Proc. Roy. Soc. London, A*, 281, 487, 1967.
- [10] Harris, K.K., G.W. Sharp, and W.C. Knudsen; Ion temperature and relative ion composition measurements from a low latitude polar-orbiting satellite, *J. Geophys. Res.* 72, 5939, 1967.
- [11] Knudsen, W.C., and G.W. Sharp; Ion temperatures measured around a dawn-

- dusk-auroral-zone satellite orbit, *J. Geophys. Res.*, 72, 1061, 1967.
- [12] Whipple, E.C., Jr.; The ion trap results in 'Exploration of the upper atmosphere with the help of the third Soviet sputnik', *Proc. IRE*, 47, 2023, 1959.
- [13] Gordon L.W.; The Langmuir plate and spherical ion probe experiments aboard explorer XXXI, *Proc. IE³*, 1072-1077, 1969.
- [14] Hanson, W.B., S. Sanatani, D. Zuccaro, and T.W. Flowerday; plasma measurements with the retarding potential analyzer on OGO 6, *J. Geophys. Res.* 75, 5483-5501, 1970.
- [15] Massey, H.; The study of ionospheric structure using space vehicles, *Space Phys. Chap. 6*, Cambridge Univ. Press, 1964.
- [16] Stroud, W.G., W. Nordberg, and W.R. Bandeen; Rocket grenade measurements of temperature and winds in the mesosphere over churchill, Canada, *J. Geophys. Res.* 65, 2307-2322, 1960.
- [17] Ainsworth, J.E., D.F. Fox, and H.E. LaGow; Upper-atmosphere structure measurement made with the pitot static tube, *J. Geophys. Res.*, 66, 3191-3213, 1961.
- [18] Jones L.M.; Upper air structure measurements with small rockets, in *Space Res.*, 2, 1037-1048, 1961.
- [19] Blamont J.E., and M.L. Lory; New direct measurements of ionosphere temperature, in *Rocket and Satellite Meteorology*, edited by H. Wexler and J.E. Caskey, Jr., 71-75, North-Holland publishing Company, Amsterdam, 1963.
- [20] Katsumata, I., and M. Okazaki; Ion sensitive probe-a new diagnostic method for plasma in magnetic field., *Japan J. Appl. Phys.* 6, 123-124, 1967.
- [21] 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)」電気学会誌出版中.
- [22] 南, 堤, 竹屋 ; 「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」電気学会論文誌第100巻A, 253-258, 1980.
- [23] Hines, C.O.; International atmospheric gravity waves at ionospheric heights., *Can. J. Phys.*, 38, 1441-1481, 1960.
- [24] Holmes, J.C., C.Y. Johnson, and J.M. Young; Ionospheric Chemistry, *Space Res.* V, 756-766, 1965.
- [25] Moore R.H., and R.K. Zeigler; The solution of the least square problem with special reference to high-speed computers., Los Alamos Scientific Laboratory Univ. California, LA-2367, 1960.
- [26] Nicolet, M.; A representation of the terrestrial atmosphere from 100 km to 3,000 km., *Penn. State Univ. Ionospheric Res. Sci. Rept.*, 155, 1962.
- [27] Jacchia, L.G.; Revised static models of the thermosphere and exosphere with empirical temperature profiles., *Smithsonian Astrophys. Observatory Special Rept.*, 332, 1971.
- [28] Knudsen, W.C. and G.W. Sharp; Evidence for temperature stratification in the E Region., *J. Geophys. Res.*, 70, 143-160, 1965.
- [29] Fanley, D.T., J.P. McClure, D.L. Sterling, and J.L. Green; Temperature and composition of the equatorial ionosphere, *J. Geophys. Res.* 72, 5837-5841, 1967.