

K-10-10号機による下部電離層の イオン及び中性大気温度の同時測定

佐々木 進・小山 孝一郎
村里 幸男・矢守 章
河島 信樹・平尾 邦雄

Rocket Measurement of Ion, Neutral and Electron Temperatures in the Lower Ionosphere

Abstract: A direct measurement of ion and neutral temperatures simultaneously in the lower ionosphere was successfully carried out by a shadow method from a sounding rocket launched from Uchinoura, Japan, on September 22, 1973. The apparatus based on this method and the obtained data of ion and neutral temperatures together with electron temperature simultaneously measured by an electron probe are described in details. The data are consistent with the prediction that ion, neutral, and electron temperatures are nearly equal to each other in the lower ionosphere and they show the existence of interesting gross structures in the temperature profiles of this region.

概 要

Shadow methodを用いてK-10-10号機(1973年9月)で下部電離層のイオン及び中性大気温度を同時測定することに成功し、温度プロファイルが得られた。

これらは同時に搭載された電子プローブ測定による電子温度プロファイルとほぼ一致し、更にこれらのプロファイルに興味深い構造があることが示された。

§ 1. 緒 言

電離層はイオン、電子及び中性大気から成りたっており、この巨大なプラズマ大気は地球磁場と相互作用して種々の興味ある現象をひきおこしている。特に下部電離層域(100~150 km)は、地球磁場の変動を作っていると言われる電流圏を含み、電離層のうちでも極めて活発に活動している領域である。これらのメカニズムを研究する上で、各構成粒子の密度温度の情報(特にそのプロファイル)が重要であり、以前から各種プローブを使ったロケット実験や地上からの電波のバックスキャッターの方法等でこれらの測定が試みられてきた。その結果プラズマ密度・電子温度については、既に各所で多くのデータが得られ成果があがっている

のに対し、イオン温度・中性大気温度については未だに十分なデータが得られていない現状である。これは主としてプラズマ密度・電子温度測定については既に早くからプローブ測定法が確立されていたのに比べて、イオン温度・中性大気温度測定にはそのようなものが開発されていないことが原因になっている。我々は以前から shadow method と呼ばれる方法を用いてこれらの温度測定器の開発を手がけてきた。本質的には通常の電子プローブが電場によってプローブに流入する電子数を制御してその情報から電子密度を決定するのに対し、この方法はメカニカルな方法によってプローブに流入するイオン・中性子数を制御してその情報からこれらの温度を測定するものである。この原理を用いて1969年 K-10-5号機でイオン温度測定に成功して以来、イオン・中性大気温度同時測定器の開発にとりくみ、1973年 K-10-10号機でこれらの温度の同時測定に成功した。これは直接的な方法で下部電離層のイオン・中性大気温度を同時測定した初めてのものであり、いくつかの興味深いデータが得られた。我々の目先している領域の更には人工衛星で(ドラッグ)又はるか下の領域は気球等でかなり定常的な測定が可能であるが、この高度領域の測定は主としてロケット実験に頼らざるを得ず、supersonicで飛翔しながら短時間の間にレスポンスのよい測定を行う必要があるが、我々の開発した計器はそのような条件の下で非常に有効である。最近同様な方法がアメリカで提案されているが、未だ実験は行われていない[1,2]。(G.Fournier, 1971; L.H.Brace et al., 1972)

以下 § 2 で測定原理、§ 3 で測定装置、§ 4 で今回得られたデータ及びその解釈を順に述べる。

§ 2. 測定原理

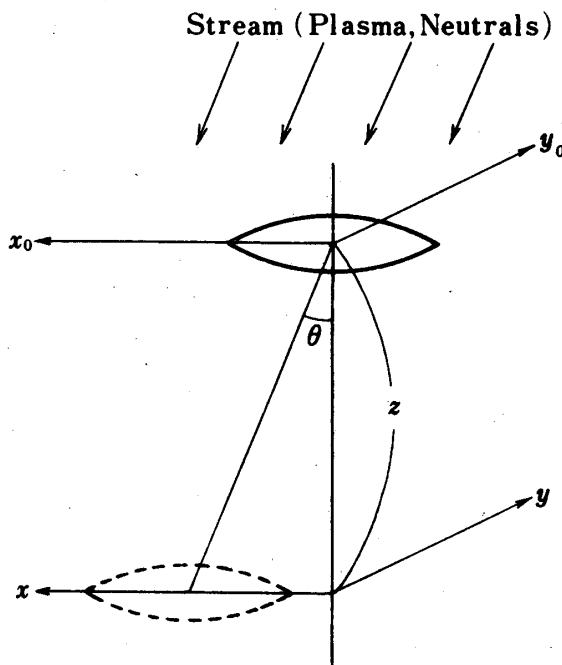
測定はロケットが超音速で飛翔する事を利用する。その主な原理は流れている媒質の中に障害物を入れた場合、その後媒質の密度の減少による影ができ、その影のでき方が流れの速度と媒質の温度に依存するという性質を利用する。即ち電離層を進行しているロケットから見れば、イオン及び中性大気はロケット方向に流れてくるように扱えるので、その流れの中に適当な障害物を入れれば、その下流ではイオン及び中性大気の密度が減少して影ができる。この影の部分の密度減少量及び流れ方向の flux 減少量は、Maxwell分布を仮定して single particle の運動を重ね合わせるにより計算出来る。この原理を用いて既に実験室ではイオン温度測定の例がある[4]。特に Fig 1 に示すようにこの障害物が円板の場合解析が容易で、その後に行える影の部分の密度減少量及び流れ方向の flux 減少量は、次の様な式で表わされる[3]。(Al'pert 及び Gurenvich の計算)

$$\delta n(x, y, z) = \frac{n_0}{z^2} \frac{M}{2\pi kT} \int_{s_0}^{\frac{3}{2}} dx_0 dy_0 \int_0^{\infty} V^2 \exp \left\{ -\frac{M}{2kT} \left[\frac{V^2 (x-x_0)^2 + [V(y-y_0) - V_0 z \sin \Psi]^2}{z^2} + (V - V_0 \cos \Psi)^2 \right] \right\} dV \dots (1)$$

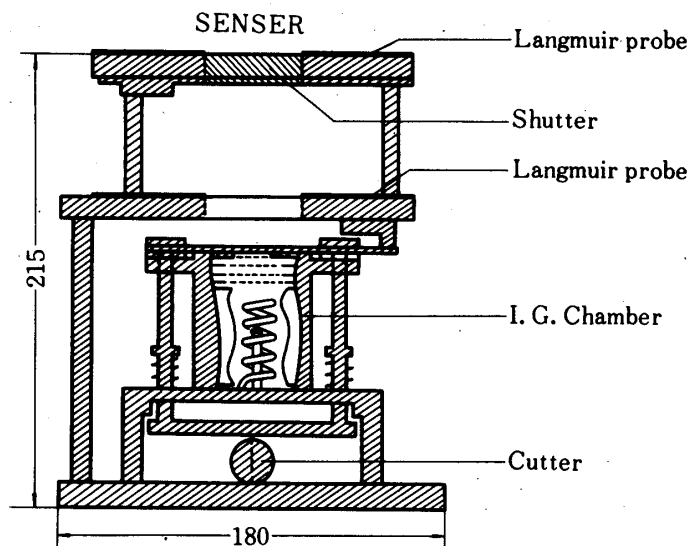
$$\delta F_z(x, y, z) = \frac{2Mn_0}{z^2} \left(\frac{M}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} \int_{s_0}^{\frac{3}{2}} dx_0 dy_0 \int_0^{\infty} V^3 \exp \left\{ -\frac{M}{2kT} \right.$$

$$\left[\frac{V^2(x-x_0)^2 + [V(y-y_0) - V_0 z \sin \Psi]^2}{z^2} + (V - V_0 \cos \Psi)^2 \right] dV \dots\dots(2)$$

ロケットの速度及び姿勢はわかっているのので、この式を用いてこれらの温度を計算することができる。イオンについては円板形の二枚のラングミュアプローブを用いて影のない部分(上流側プローブ)と影のある部分(下流側プローブ)のイオン密度を同時測定し温度を計算する。中性大気については上流部にある写真用シャッターの開閉に伴う下流側の流れ方向の flux の変化を電離真空計で測定する。無論電離真空計は、チェンバー内の中性密度を測定するものだがこれがチェンバー入口の flux に比例する事を利用する。第2図はこのような仕様を満たすように設計した測定器のイラストである。(1)(2)式を用いてこの形状の場合について計算すれば、イオンの上下流プロ-



第1図 原理図



第2図 測定器のイラスト

ブの密度比とMach数 ($V_{\text{rocket}}/V_{\text{thermal}}$) との関係及びニュートラルのシャッター開閉に伴うチェンバー入口での flux比とMach数との関係は第3図に示したようになる。特にニュートラルの場合は壁との衝突でチェンバーに入り込んで来る粒子も考慮し、この際の散乱は完全弾性衝突を仮定した。又は流れの方向とセンサの法線方向のなす角が 10° をこえるとこれらの曲線は急速にずれてくる。

3. 測定装置

(1) イオン温度測定部

今回の実験で使用したラングミュアプローブは、いずれも厚さ1mm外径140mm、内径45mmの穴あき円板(銅板)で、表面に金メッキ処理をほどこし、デルリン板の上にはりつけた。両プローブの間隔は70mmである。測定モードは3.5V4Hz鋸歯状波モード(モードI)1秒と直読式プラズマ密度測定モード(モード

II)3秒を交互にとった。モードIは通常のラングミュア特性をとる為のもので、その回路のブロックダイアグラムを第4図に示した。モードIIはラングミュア特性解析を回路内で処理したプラズマ密度・電子温度の情報を直読化して出力するモードである。この回路のブロックダイアグラムを第4図に示した[5]。この回路の詳細及び本実験で得られたプラズマ密度・電子温度のデータについては別項で詳しい報告がある。

(2) 中性大気温度測定部

中性大気密度をレスポンス良く測定する為には、通常、アイオニゼーションゲージを使用する。このゲージはヒーター(熱電子放出)、グリッド(電子の加速)、プレート(イオン収集)の三者から成り一般にプレートに流れ込むイオン電流は

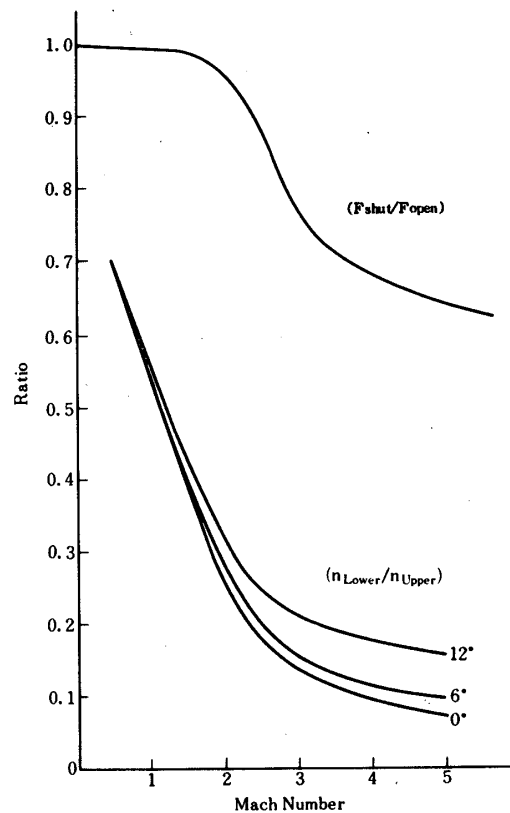
$$I_i = GnI_e$$

I_i : イオン電流

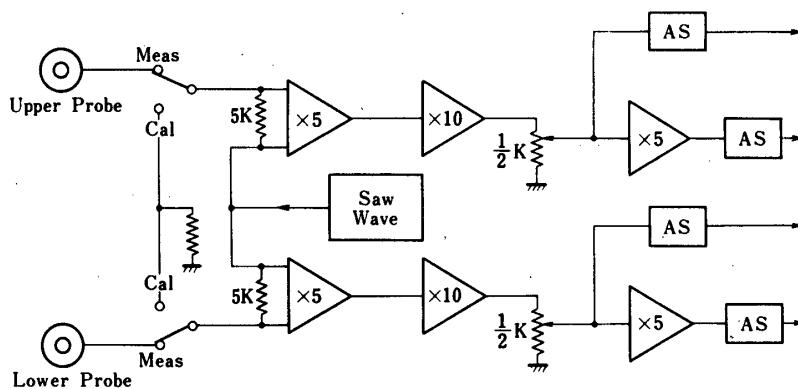
I_e : エミッション電流

n : 中性大気密度

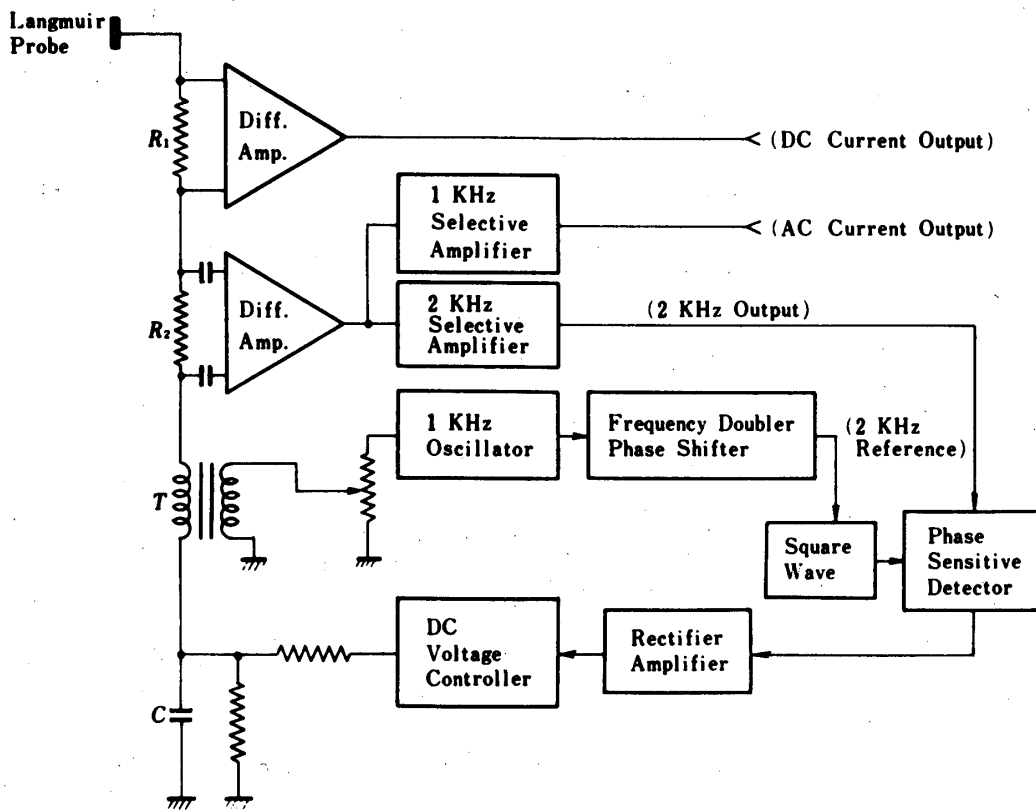
G : ゲージの形状で決まる定数



第3図 イオン密度比(上下流プローブ)及び中性大気 pressure 比(シャッター開閉)とMach数との関係



(a) モード I

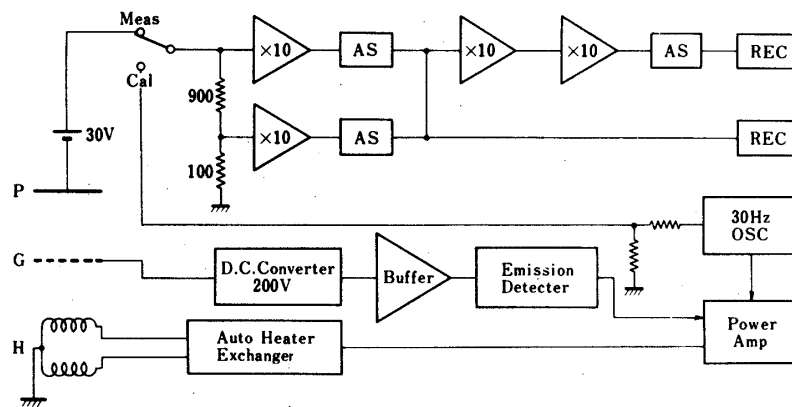


(b) モード II

第4図 イオン温度測定用回路のブロックダイアグラム

我々の使用したゲージでは $G = 10^{-19}$ (MKS) である。従って I_e を一定に保っておけば、 I_i は中性大気密度にリニアに比例することになり密度を測定できる。ただ中性大気をいったん電離してイオンを集める為、プラズマと中性大気が同時に存在する電離層の場合、プラズマ内のイオンをも集めてしまうので中性大気単独の密度測定ができない。これを解決する

為我々は2つの工夫をほどこした。1つはゲージの入口に4枚のメッシュをはって中側の2枚に $\pm 30\text{ V}$ の電位をかけ入ってこようとするプラズマを追いかえす。この方法は back-scatter型のプラズマ源で作った $60\text{ cm } \phi$ 、長さ 1 m のプラズマ(プラズマ密度 $10^4 \sim 10^6 / \text{cc}$)の中で充分有効である事を確認した。又このメッシュがコンダクタンスに及ぼす影響は殆んどない。更にもう1つの工夫は、ヒーター電流を 30 Hz で変調し(半波)、エミッション電流を振る事により、中性大気が電離されてできたイオン電流も 30 Hz で振られる事を利用して、プレート電流のうち交流分だけを検出してそのピーク値から中性大気密度を読みとるようにした。こうしてプラズマ中のイオンによる電流は直流的なので落とすことができる。この場合、ヒーター電流の変化にレスポンスしてエミッション電流が変化しうる様に、ヒーターは熱容量の小さいものを使う。更に安全のためゲージには2本ヒーターを入れておき、片方が切れてももう一方のヒーターに自動的に切り変わる様設計した。又エミッション電流は、ヒーター電流を一定にした時真空度にかかなり依存するので(実験では 10^{-3} Torr では 10^{-6} Torr の時の約 $2/3$ となる)、エミッション電流を一定に保つコントロール回路を製作した。中性大気温度測定器の回路のブロックダイアグラムを第5図に示す。この回路を用いて試験した結果、プレート電流ピーク値と真空度との関係は、 $5 \times 10^{-3}\text{ Torr} - 5 \times 10^{-6}\text{ Torr}$ にわたって良好な直線性を示した。測定モードは 0.25 秒ずつシャッターの開閉に同期させて high, low gain 測定をくり返した。



第5図 中性大気温度測定用回路のブロックダイアグラム

(3) センサー各機構部

センサーは強度・重量及び真空にした場合の outgas の点からステンレス及び高アルミ材を使用した。以下述べる各機構部については充分なテストを行い、回路についても 100 時間の running testを行った。

a I.G. チェンバー開封機構部

I.G. の heater 点火直後の outgas 及び chamber 各所からの outgas を減らすため、打ち上げ前 I.G. chamber は約 10^{-3} Torr で封じ切り上空約 85 km で開封する様設計した。

これは

タイマー信号 → リレー動作 → ワイヤカッターによるピアノ線切断 → バネによる開封というシステムである。

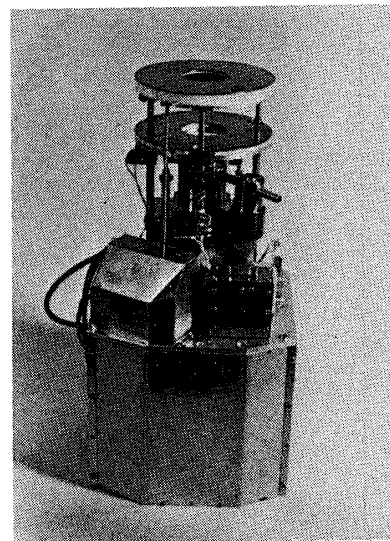
b シャッター駆道部

シャッターは I.G. チェンバーの口の上 75 mm の所で上流側ラングミュアプローブ中央にうめこまれており、径は 45 mm である。開閉動力はセンサ基板にあるロータリソレノイドからシャッターレリーズを通して伝達される。開閉周期は 1 秒 (0.5 秒ずつの開閉)、開閉時間は数十 msec で動作する。ロケットはスピン (約 3 c/s) しながら飛行するのでその遠心力の下でも充分動作する様製作した。

c エレクトロニクス部

イオン温度測定部と中性大気温度測定部及び付属回路とをまとめてシールドボックス内に入れ、センサとの間は同軸、シールド線で接続した。

第 6 図に本組み直前に撮影した本測定器全体の写真を示す。総重量は 9.0 kg であった。

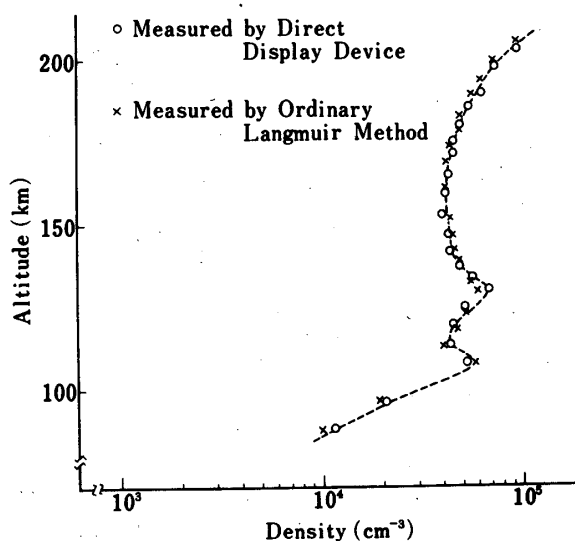


第 6 図 K-10-10 号機搭載用計器

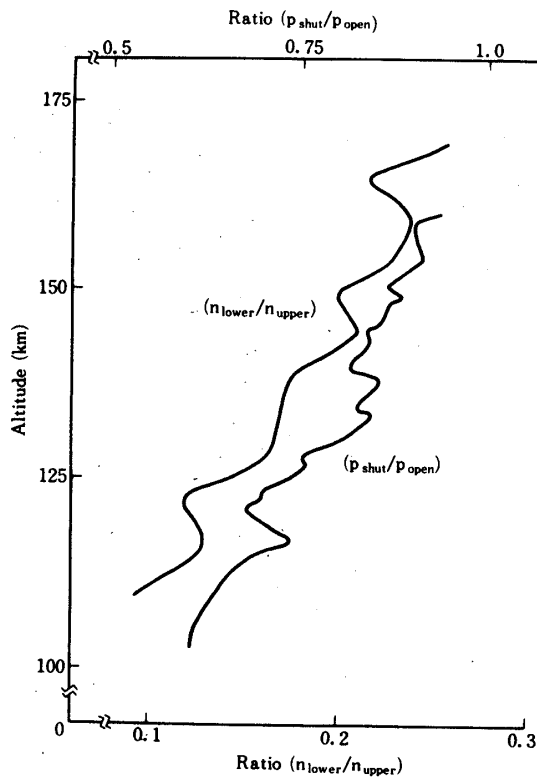
§ 4. 測定データ

本測定器を搭載した K-10-10 号機は、1973 年 9 月 22 日午後 6 時 20 分鹿児島県内ノ浦町から発射角 78.5° で打ち上げられ、precession 6° 最高高度 242 km の順調な飛翔を行った。実験当日の電離層の状態は、同時に搭載した直読式電子密度計によれば、110 km 付近に sporadic E 層が、135 km 付近に intermediate layer が現われているという極めて特徴的な様子をしていった (第 7 図)。観測器は高度 90 km から動作開始し、以後海に落下する迄順調に動作したが、高度 170 km 付近からセンサー法線とロケット進行方向とが急速にずれ始めたため、データ解析は 170 km 迄を行った。

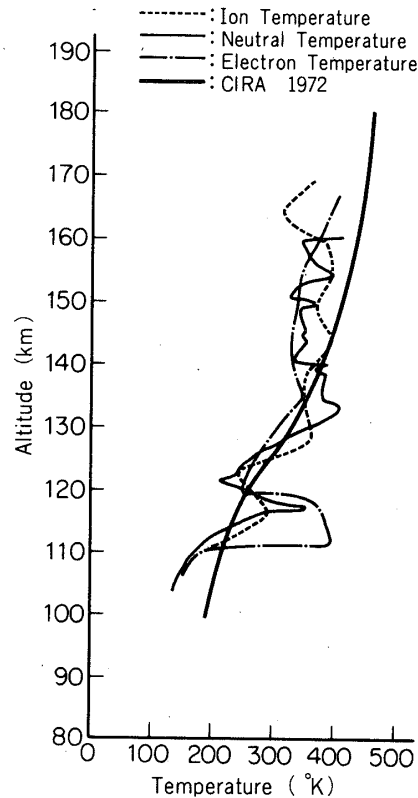
第 8 図は、イオンについては上下流プローブの密度比の高度変化、中性大気についてはシャッターの開閉に伴う下流でのフラックス比の高度変化を示したものである。これを § 2 で示した式を用いて温度プロファイルに書き直せば第 9 図のようになる。これには同時に搭載された電子温度プローブによって得られた電子温度プロ



第 7 図 実験当日の電子密度プロファイル

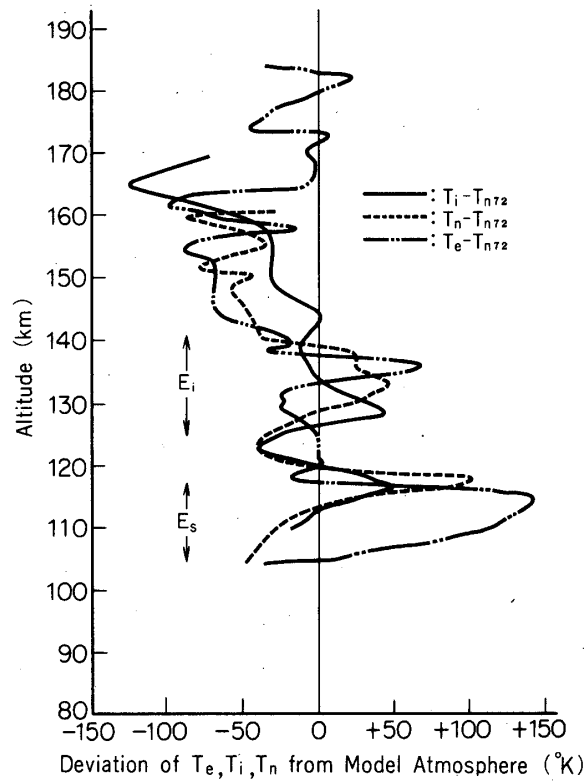


第8図 イオン密度比(上下流プローブ)及び中性大気 flux 比(シャッター-開閉)の高度変化



第9図 K-10-10号機で得られたイオン及び中性大気温度プロファイル, 電子温度プロファイル

ファイル[6]が同時に示されている。得られた電子・イオン及び中性大気温度は, C I R A 1972年の model 大気[7]から得られた中性大気温度と概して一致していると考えられるが, Es layerの近及び中間層[8]の近くでは幾分モデル温度からの deviation がある様に思われる。このことをやや詳細に調べる為に, 得られた3つの温度とC I R A 1972年の model 大気温度の差をとってみると, 第10図に示すようにEs layerのやや上部, 中間層の内部で $(T_e, T_i, T_n) - T_{n72} > 0$ となり上記二つの高度で約 100°K の温度上昇があると結論して良いと思われる。過去においてEs layerのやや上部における電子温度の上昇についてはAubry等の観測[9]があり, Hooke[10]等によって理論的に検討されている。中間層における温度上昇については近い将来別に論ずることにしたい。さらに第9図から夜間においては電子・イオン及び中性大気は熱的平衡状態にあると結論してよいと思われる。高度100 km 近辺では太陽紫外線を唯一の熱源として考える限り, 電子はこの高度において豊富に存在する中性大気との衝突によって夜間昼間の別なく中性大気とほぼ等温になることが理論的に予想されるが, 前に電子温度プローブによる今迄の観測結果[11]から昼間においては100 km 近辺に於ては電子温度は中性ガス温度より 100°K 程度高く, 夜間においては中性大気温度とほぼ等しくなることを示唆したが, 第9図は上述のことを支持していると思われる。



第10図 観測された3つの温度のモデル大気温度からの差。モデル大気温度は高度200kmにおいて測定された電子温度が (500 ± 100) °Kであることから $T_{ex}=500$ °Kが選ばれた。第9図を参照するとEs layerのやや上部(117 km), 夜間中間層(130~140 km)でモデル大気より観測値が100°Kほど高い。

§ 5. 結 論

Shadow methodを用いた温度測定器は、ロケットによる下部電離層域のイオン及び中性大気温度の直接測定器として有力な手段であると考えられる。特にこれらの温度と電子温度との deviation の大きい昼間の測定に興味がある。最近センサーを大巾に簡素化する目度がつき、今回得られたデータの確認と更に精密なデータを得るため、1975年夏に同様の実験を予定している。

1974年7月30日新設部(科学)

参 考 文 献

- [1] Fournier, G., Principle of a simple measure of ion temperature in the ionosphere, J. Geophys. Res. 76, 3159, 1971.
- [2] Brace, L. H., W. R. Hoegy, R. F. Theis, and L. E. Wharton, Neutral-particle wake

- method for measuring the atmospheric temperature from a satellite, J. Geophys. Res. **77**, 1885, 1972.
- [3] Al'pert. Ya. L., A. V. Gurenvich and L. P. Pitaevskii, Space Physics with Artificial Satellites, Consultants Bureau (New York) **20**, 1965.
- [4] Kawashima. N., Ion Temperature Measurement of a Streaming He plasma by a Double Probe Method, Appl. Phys. Letters **7**, 325, 1965.
- [5] Kawashima. N., and A. Yamori, Direct Display of Plasma Density and Temperature, J. Apply. Phys. **42**, 5400, 1971.
- [6] Hirao. K., and K. Oyama, An improved type of electron temperature probe, J. Geomag. Geoelect., **22**, 393-402, 1970.
- [7] COSPAR INTERNATIONAL REFERENCE, 1972.
- [8] Fujita, K., T. Oyama and T. Tohmatsu, A numerical computation of the ionization redistribution effect of the wind in the nighttime ionosphere, J. Atmosph. Terr. Phys, **33**, 687-760, 1971.
- [9] Aubry, M. et al., Some rocket results on sporadic E, Radio Science, **1**, 170-174, 1965.
- [10] Hooke, W. H., Electron., ion and neutral gas temperatures in temperate latitude sporadic E layers, Planet. Space. Sci., **17**, 737-748, 1969.
- [11] 平尾邦雄, 小山孝一郎, 内之浦における電子温度分布の日変化および太陽活動度依存性, 宇宙観測 Symp. 176-181, 1973.