

## Glass-Sealed Langmuir Probe および Electron Temperature

## Probe による極域電離層の観測

## ——電子密度・温度の測定——

小山孝一郎\*・平尾邦雄\*・宮崎 茂\*\*

Measurement of Electron Density and Temperature by  
Means of Contamination-Free Probe

Koichiro OYAMA\*, Kunio HIRAO\* and Shigeru MIYAZAKI\*\*

**Abstract:** In plasma diagnosis by means of a Langmuir probe, contamination of the electrode is a quite serious problem. In order to get reliable data of space plasma, cleaning of the electrode is an essential requirement. The instrument which is not influenced by the electrode contamination must be developed. In this paper we recommend two types of probes; one is a glass-sealed Langmuir probe and the other is an electron temperature probe. These two probes are free from contamination effects and can give reliable electron density and temperature in the ionospheric plasma. Finally this paper briefly discusses the application of the Langmuir probe to polar ionosphere study.

概要: DC ラングミュアプローブによる電離層電子密度・温度の測定において, 電極表面の汚染の影響は, まず第一に留意しなければならない. 本論文では, この電極汚染の影響をさけて信頼し得るデータを得るために開発されたガラス封入型 DC ラングミュアプローブ (Glass-sealed Langmuir probe), および電子温度プローブ (Electron temperature probe) について概説し, あわせて, 極域電離層研究への応用の可能性をさぐる.

## 1. は じ め に

電離層プラズマの電子密度・温度は, 1947 年 REIFMAN, DOW 等によって観測されて以来, 今日にいたるまで, 電離層熱収支, あるいは電離層における諸々の化学反応の研究に必

\* 東京大学宇宙航空研究所. Institute of Space and Aeronautical Science, University of Tokyo, Meguro-ku, Tokyo.

\*\* 郵政省電波研究所. Radio Research Laboratory, Nukukita-machi, Koganei-shi, Tokyo.

要かくべからざる基本的な物理量として、主に、DC Langmuir probe によって測定されてきた。しかしながら基本的な物理量であり、たくさんの観測例が報告されているにもかかわらず、特に、電子温度に関してはデーターはばらつき、信頼できる資料はきわめて少ないように思われる。その主なる理由は、Langmuir probe として使用される電極の表面汚染に起因するものと考えられる。電極に印加する電圧の掃引速度、まわりのプラズマ密度の高低によって、ある時にはほぼ正しい、ある時にはきわめて不合理な電子密度・温度を与えるからであろう。本論文では上記の観点に立ち、信頼できるデーターをうるためには、まず上記のような電極表面の汚染に留意すべきことを強調し、電極汚染の影響をさけるためには後述するように電子温度プローブ、glass-sealed Langmuir probe の使用をすすめる。

特に、昭和基地におけるロケット観測のように、直接に研究にタッチする研究者の手を

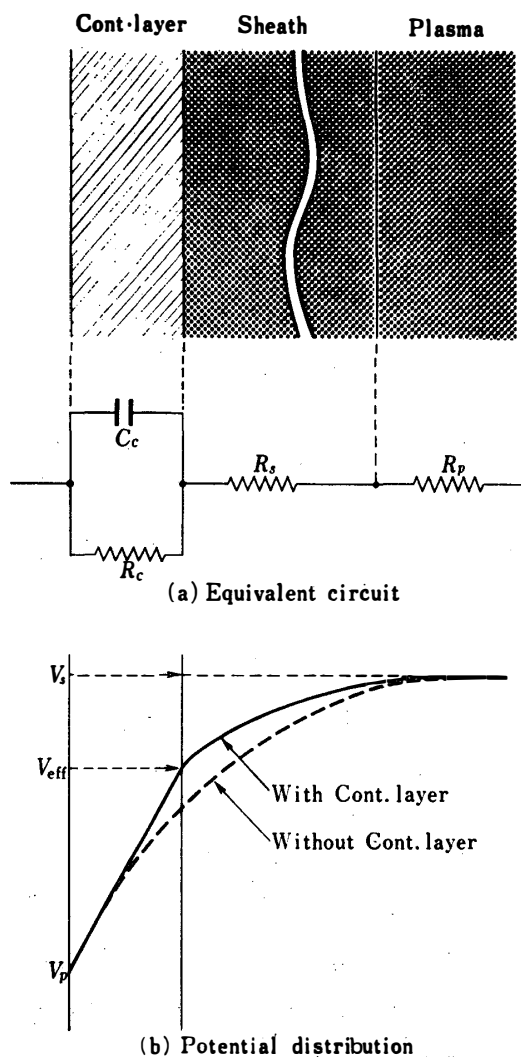


図 1 (a) 電極表面の汚染物質による静電容量  $C_c$  と抵抗  $R_c$ .  $R_s$ ,  $R_p$  はシース抵抗およびプラズマ抵抗である。

(b) 電極表面のよごれがあるために実質的にシース境界に印加される電圧  $V_{eff}$  は実際に印加した電圧  $V_p$  と異なる。

Fig. 1. Equivalent circuit (a) and potential distribution (b) of the contamination effect of the Langmuir probe.

なれて、計器が搭載されることがおこりうる場合、取り扱いが簡単なことが根本的な要求としてあげられるが、上記二つのプローブはこの条件を十分に満たしていると考えられる。

## 2. 電極のよごれ

プローブ表面は多かれ少なかれ汚染物質でおおわれている。この層は図1のように電気的には抵抗と静電容量が平行に接続されたものと考えれば、プローブ表面のよごれに伴う現象を説明するのに都合がよい。汚染電極によって得られる電圧電流特性は、プローブ電圧の掃引の方向によって、得られるプローブ電流が異なり、図2のようなヒステリシスカーブ

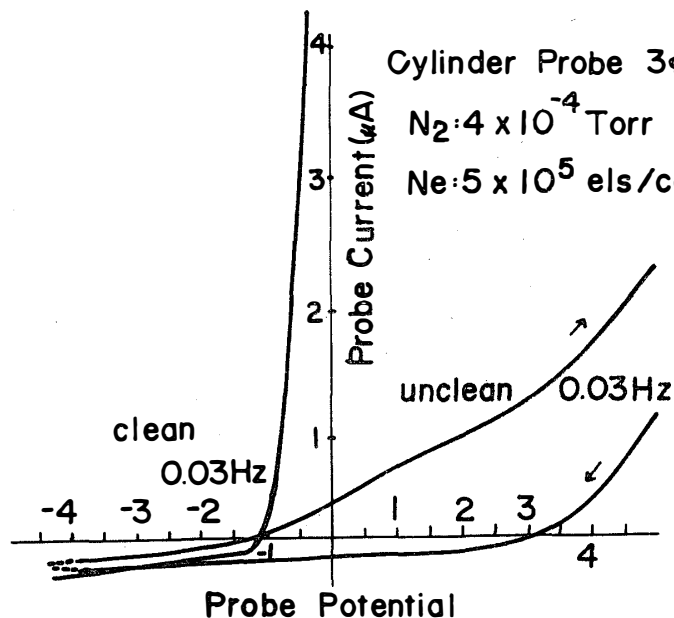


図2 汚染電極により得られた電圧電流特性。比較のために上記電極と同じ材質、同じ寸法、形状でイオンボンバードされた電極による電圧電流特性を示してある。

Fig. 2. Characteristics of probe current and potential obtained by uncleaned and cleaned cylinder probe.

をえがく。このようなヒステリシスカーブをセミログプロットすると、電子温度を算出できるほどきれいな直線にのり、従ってわれわれは、往往にして汚染電極によっても正しい電子温度を得ることが可能であると結論しがちである。しかしながら、汚染電極によって得られた電圧電流特性からの電子温度は、正しい値より高いことが結論される。図3は K-9M-28号機に搭載された電子温度プローブ（後述）と DC ラングミュアプローブによる電子温度の比較であり、DC ラングミュアプローブによる電子温度は、電子温度プローブのそれと比

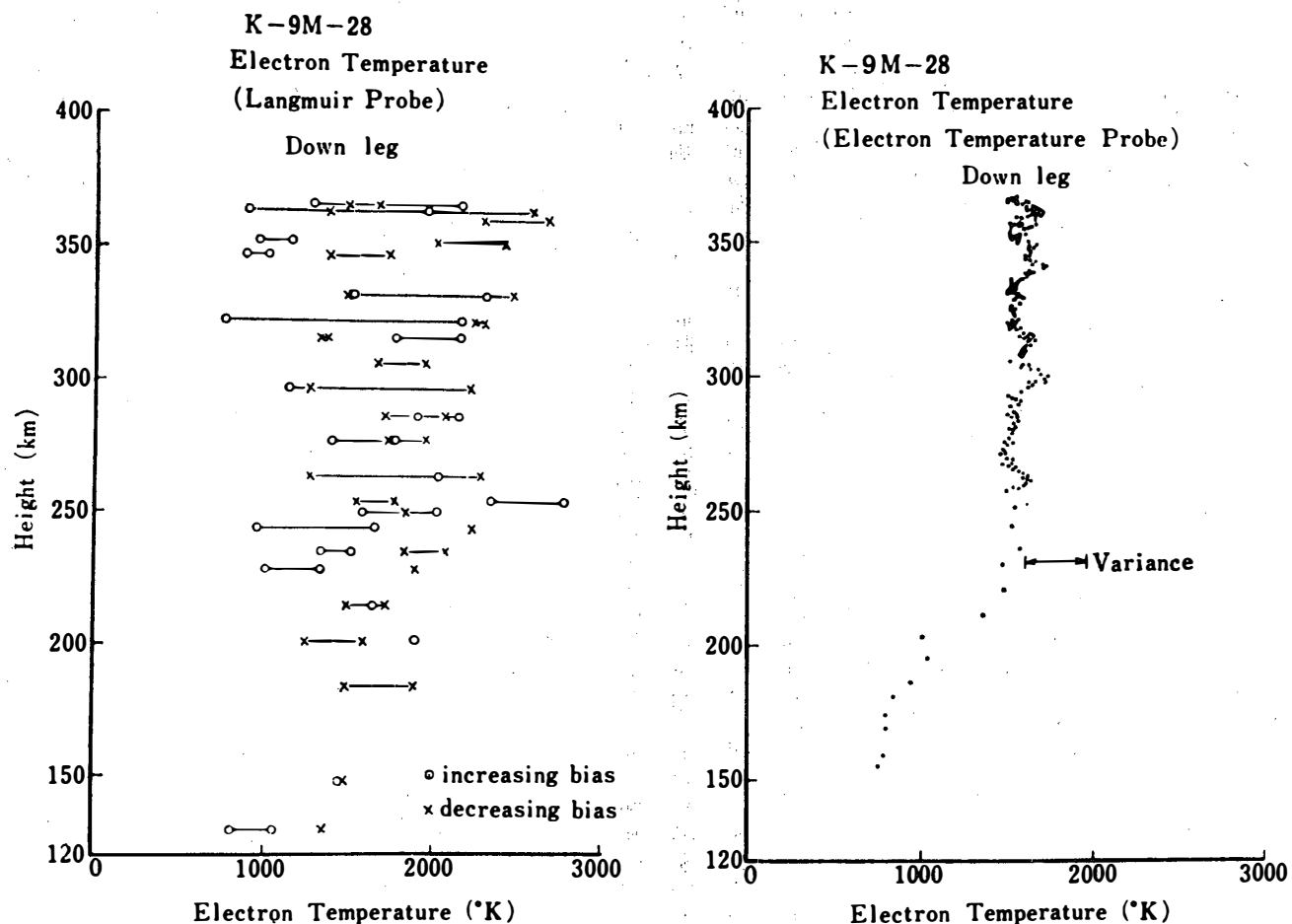


図 3 DC ラングミュアプローブ (左) と電子温度プローブ (右) による電子温度の比較測定, DC ラングミュアプローブによる電子温度はきわめてばらついており, これでは高度に対する正確な電子温度プロファイルを得ることはできない.  
 Fig. 3. Comparison of electron temperatures obtained by the Langmuir probe (left) and by the electron temperature probe (right).

較して、極端にばらついており、汚染された DC プローブでは正しい値をうることができないことを容易に知ることができよう。

### 3. 電子温度測定

電極の汚れの影響をさけ、信頼できる電子温度をうるために、実際には、電子温度プローブ、ガラス管封入型 DC ラングミュアプローブの二つの測定器が考えられる。この節では上記二つの測定器について説明を加える。

#### 3.1. 電子温度プローブによる測定

電極に高周波電圧を印加した結果、シースの非直線性によって生ずるフローティング電圧の変動分から電子温度を求める電子温度プローブは、高周波電圧の電極への印加、および高入力抵抗の使用によって、汚れの影響をさけることができるという点で、一つの大きな長所を有すると言える。図4のように、著しくひずんだ電圧電流特性を与えるほど電極表面が汚染されている場合でも、この電極を電子温度プローブの電極として使えば汚れによる悪影響をさけることができる。図5はイオンボンバードした電極と、単に化学薬品を用いて洗滌した電極によって得られた電子温度プローブの出力波形で、両者には何らの差異もみられず、このことは、電子温度プローブが電極汚染の影響を受けないことを示している。ちなみに上記電子温度プローブの出力波形から得られる温度は、ともに  $950^{\circ}\text{K}$  であり、イオンボンバードした電極によって得られた電圧、電流特性から算出された電子温度は、 $1000^{\circ}\text{K}$  である。

実際の電離層観測に関しては、電子温度プローブは、1970年より標準化され、ほとんどすべての観測ロケットに搭載され、図6に示すような一応の基礎的なプロファイルを得ている。

標準化された電子温度プローブには、現在二つの型がある。その一つは図7(a)に示すように、電極と回路部がべつべつに構成されているもので、後述の高感度電子温度プローブに比べ、 $10^4 \text{ el/cc}$  以下のうすいプラズマ中での観測は不可能である。一方、図7(b)に示すように、センサーと電子回路が一体になっている高感度型の電子温度プローブは、まわりのプラズマ密度  $10^3 \text{ el/cc}$  以下でも十分に動作できるが、このプローブを用いなければならないような環境では、vehicle 自身による disturbance をさけるために、vehicle の外壁より少なくとも  $30 \text{ cm}$  程度はなす必要があり、このためのプローブ展張の機構に余分の space を必要とするのが欠点といえは欠点である。

以下に電子温度プローブの電氣的諸元を示す。

高周波印加電圧:  $30\text{kHz} \pm 2\text{kHz}$ ,  $0.8\text{V}$ ,  $0.4\text{p}$ , peak to peak

DC Amp. 利得: 20 dB

DC Amp. 入力抵抗:  $110\text{M}\Omega$  (低感度型),  $1100\text{M}\Omega$  (高感度型)

DC Amp. off set 電圧: 0.3V

消費電流: +18V 20 mA, -18V 7 mA

### 3.2. ガラス管封入型 DC プローブ

図8に示すように, 電極イオンボンバードによって, プローブ表面をある程度きれいにす

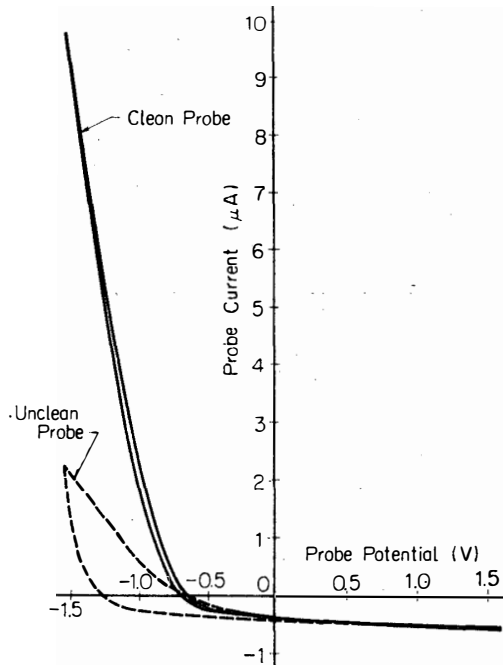


図4 電極汚染層の電子温度プローブへの影響をしらべるために使用された二種の電極による電圧電流特性, きれいな電極からの電圧電流特性のセミログプロットにより得られた電子温度は  $950^\circ\text{K}$  である。

Fig. 4. Characteristics of probe currents obtained by the uncleaned and cleaned electron temperature probe.

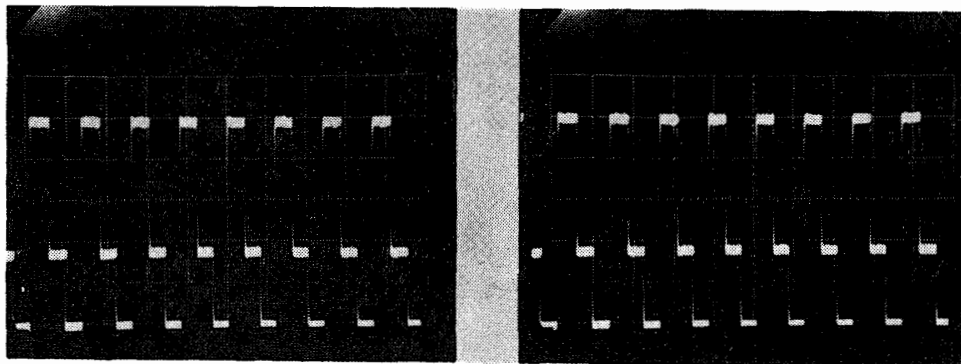
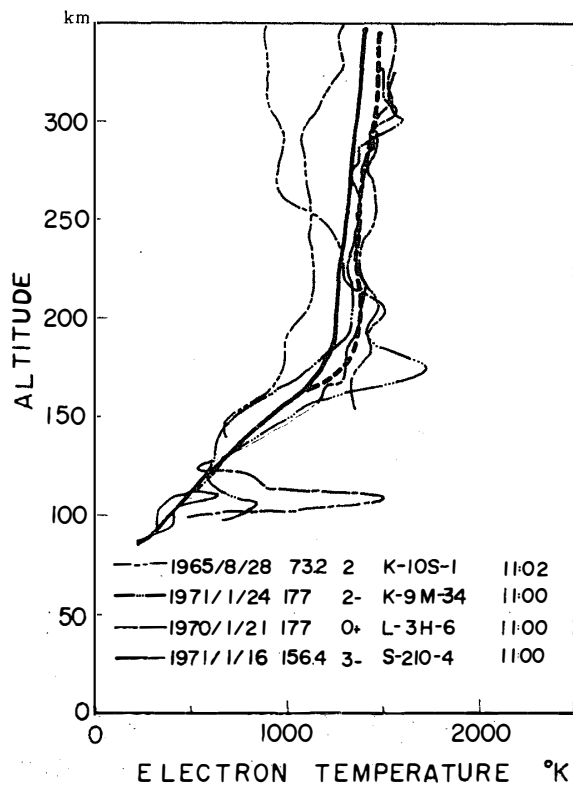


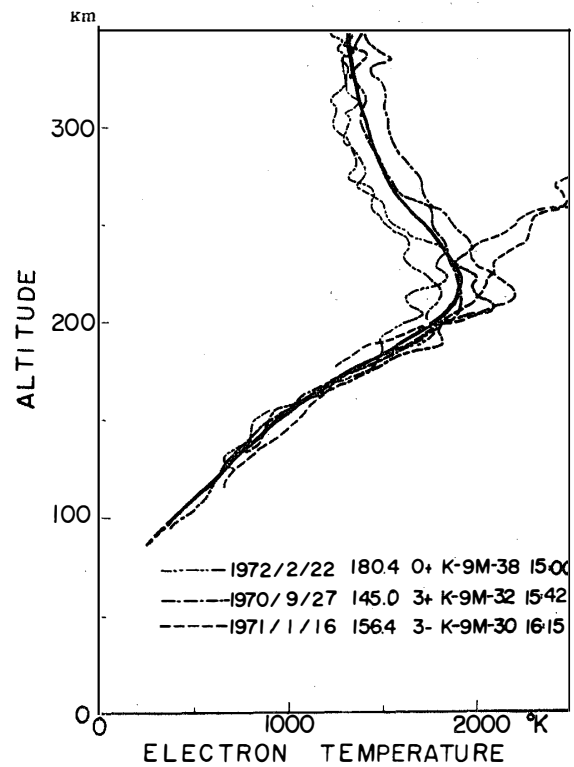
図5 汚染電極(左)ときれいな電極(右)から得られた電子温度プローブの出力波形。

両者の出力波形から得られる電子温度は  $1000^\circ\text{K}$  でこのことから電子温度プローブは電極汚染に影響されないことがわかる。

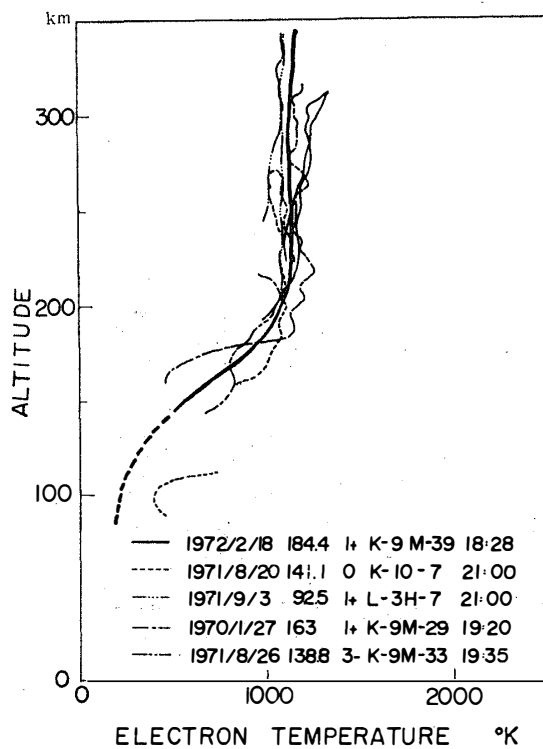
Fig. 5. Out-put waveforms of the uncleaned (left) and cleaned (right) electron temperature probe.



(a)



(b)



(c)

図 6 (a) 内之浦上空における地方時11時頃の電子温度プロファイル

(b) 内之浦上空における午後の電子温度プロファイル

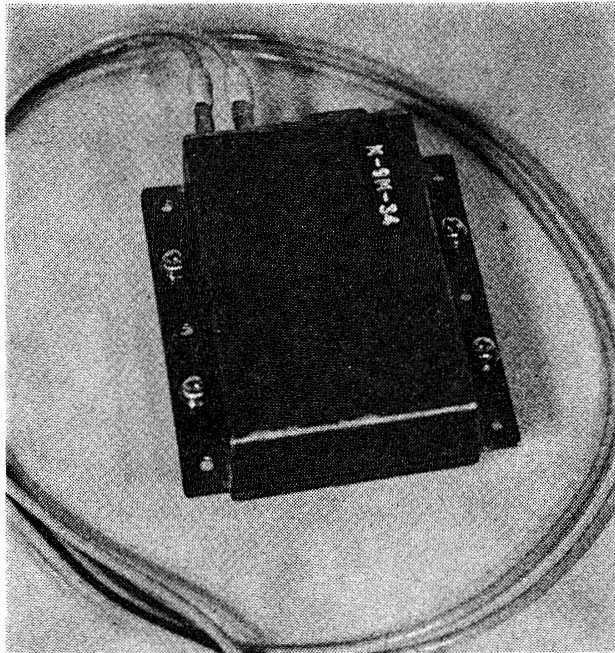
(c) 内之浦上空における夜間の電子温度プロファイル。太線は全プロファイルを平均したものである。

Fig. 6. Vertical distribution of electron temperature observed at Uchinoura, Kagoshima, Japan.

(a) at about 11:00 local time (135 EMT)

(b) in the evening hours

(c) in the night hours



(a) 標準型の角型電子温度プローブ。電極とエレクトロニクス部が別別になっている。昼間電離層電子温度測定には十分である。電子密度動作下限は  $10^4$  el/cc である。

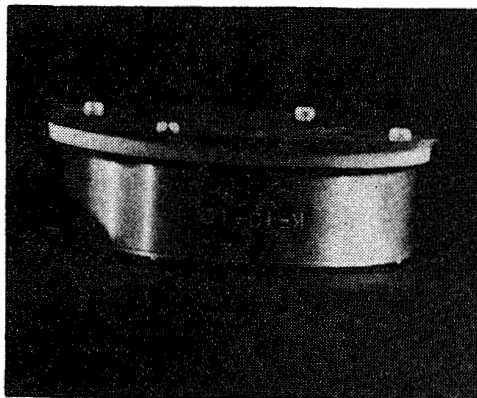
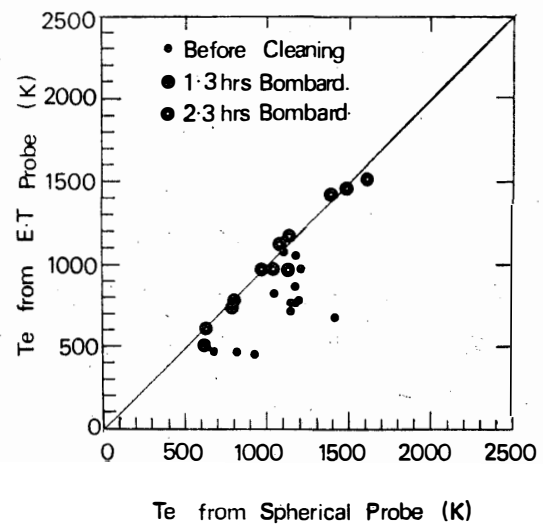


図 7 (b) 標準型の丸型電子温度プローブ、電極とエレクトロニクス部が一体になっている。夜間電離層および磁気圏などの探索に利用される。電子密度に関する動作下限は  $1 \times 10^3$  el/cc である。

Fig. 7. Payload containing the electron temperature probe.

図 8 電子温度プローブとよごれた電極およびイオンボンバードされた電極による電子温度の測定。イオンボンバードした後の電極による電子温度は電子温度プローブのそれと一致している。

Fig. 8. Comparison of electron temperatures obtained by the uncleaned and cleaned (ion bombard) spherical probe.

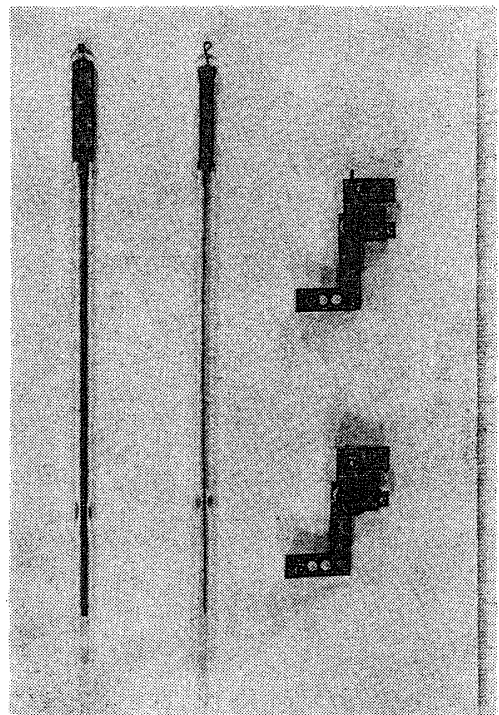




ることによって、電極表面の汚染の影響を受けない電子温度プローブと同じ結果が得られる。すなわち、正しい電子温度を得ることができる。室内実験では、(1)プラズマ中において電極に正、あるいは負の電圧を印加する、いわゆるボンバード、(2)真空中にひきながら電極を加熱する、等によって電子温度算出にさしつかえない程度に電極表面をきれいにすることができる。しかしながら、電離層プラズマの測定では、上記二つの方法によって vehicle の飛しょう中に、電極をきれいにするのは事実上不可能である。現在われわれが用いている方法は、ガラス管に封入した  $3\text{ mm}\phi \times 20\text{ cm}^L$  の円筒型電極を地上で真空中にひきながら、約  $200^\circ\text{C}$  で10時間程度加熱し、しかるのち、ガラス管を封じるものである。ガラス管に封入された電極は vehicle が電離層へはいってから、ガラス管に強い shock を与えることによりとりさることによって測定をはじめ。図9はこのプローブと shock を与える cutter である。

図 9 Glass-sealed Langmuir probe とこのプローブのガラス管をプローブの根元で破壊するための cutter.

Fig. 9. Glass-sealed Langmuir probe.



このプローブは、すでに1972年2月 S-210-7 号機によって、その性能がたしかめられて以来、今日まで引き続き使用されてきている。S-210-7 号機においては、ガラス管に封入された電極と寸法型状は、全く同じはだかのままの電極によっても電子温度の測定が行われた。図10に示すように、はだかのプローブにより得られた電子温度は、プローブ電圧掃引の方向によって、その値が違うのに対し、きれいなプローブによる電子温度は、掃引電圧の方向によらず、きわめて安定した値を示している。図11に前述の電子温度プローブの回路構成とあ

わせて、DC Langmuir probe の回路構成が示されている。DC Langmuir probe の最大の長所は、測定回路が簡単で、かつ掃引電圧を固定すれば、容易にD層電子密度測定に最も有用と思われる固定バイアス型DCプローブとしてつかえることであろう。

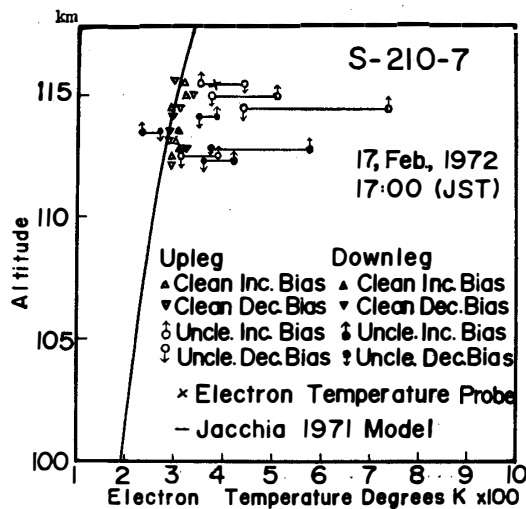


図10 S-210-7 号機により得られた Glass-sealed Langmuir probe および汚染電極による電子温度、電子温度プローブによる電子温度も示されている。

Fig. 10. Electron temperature obtained by the glass-sealed Langmuir probe.

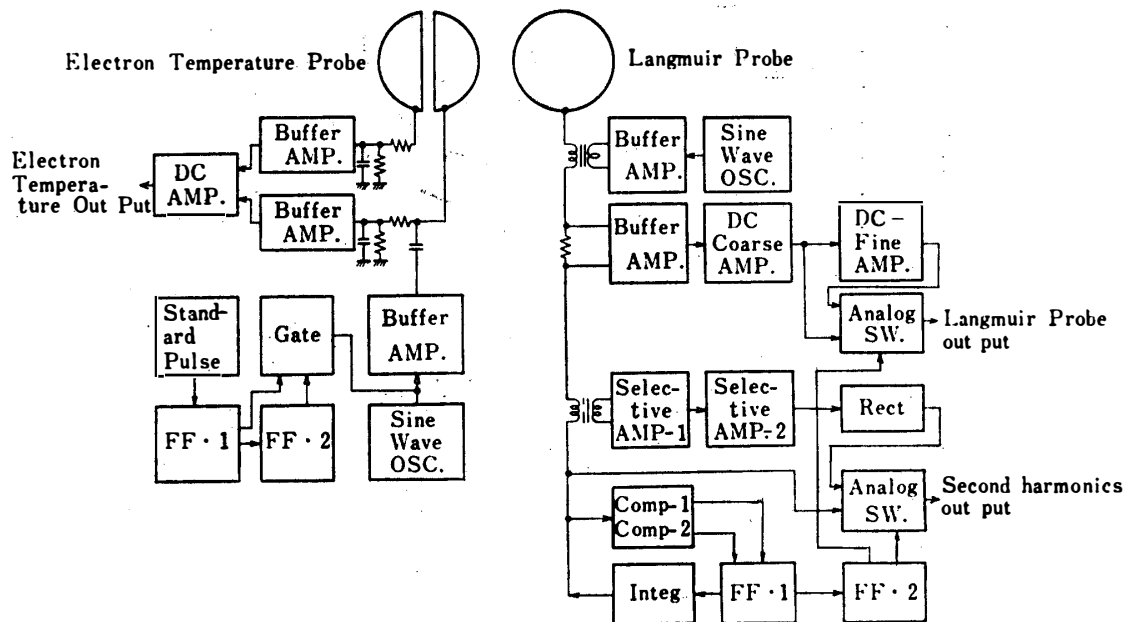


図11 電子温度プローブとDCラングミュアプローブの測定ブロックダイアグラム

Fig. 11. Block diagrams of electron temperature and the Langmuir probe.

#### 4. Glass-Sealed Langmuir Probe による電子密度測定

汚染電極の使用に伴うもう一つの悪影響は、プローブ表面の汚染物質の持つ抵抗による電

位降下のために生ずる電子密度算出における誤差である．図12 (a) は Doppler 法と固定バイアスラングミュアプローブ法による電子密度の測定結果であるが，もし固定電圧ラングミュアプローブを ionogram の  $f_oF_2$  で高度 230 km で規格化すると，それより低い高度では，DC プローブ法は電子密度を約 2 倍高く見積もる．逆に，DC プローブがほぼ正しい電子密度を与えと思われる高度 120 km 付近で，Doppler 法による電子密度にあわせるようにすると，より高い高度で DC probe による電子密度は，Doppler 法による電子密度の約 1/2 になる．

上述のように，汚れたプローブを用いることによって，DC プローブ法は密度を少なく見積もる可能性が十分にあるが，この問題は電子温度測定の場合と同様にして，glass-sealed Langmuir probe を用いることによりさけることができる．図12 (b) はガラス管封入型円筒ラングミュアプローブと汚染平板電極によって得られた電子密度プロファイルの同時比較

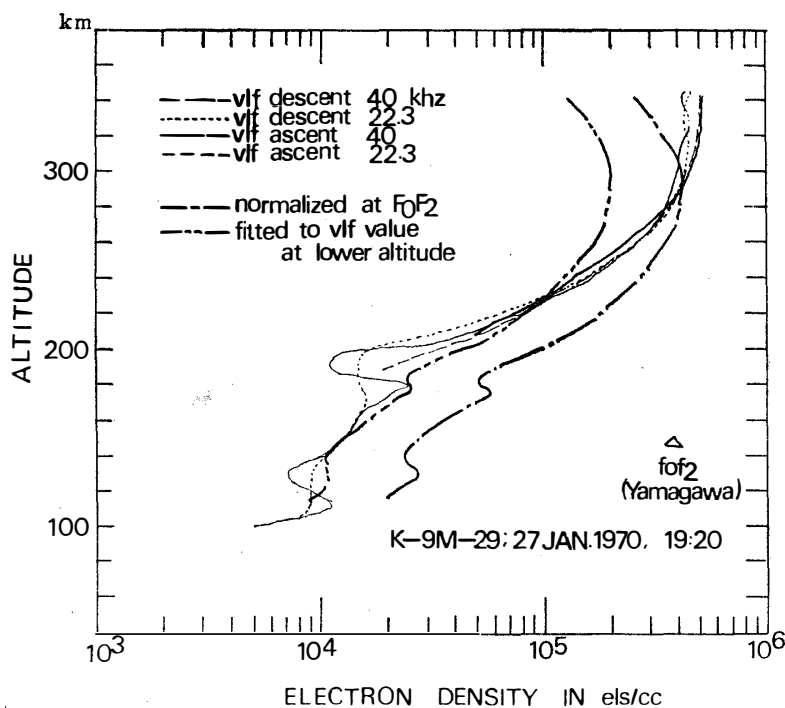


図12 (a) Doppler 法と DC Langmuir probe 法による電子密度の比較測定．DC Langmuir probe による電子密度を  $f_oF_2$  で規格化すると低高度で 2 倍程度 Doppler 法による電子密度より大きくなり，逆にはほぼ正しい電子密度を与えていると思われる低高度で Doppler 法により得られた電子密度にあわせると高高度で 2 倍程度少なめにみつめられる．

Fig. 12 (a). Comparison of electron densities obtained by Doppler method and DC Langmuir probe.

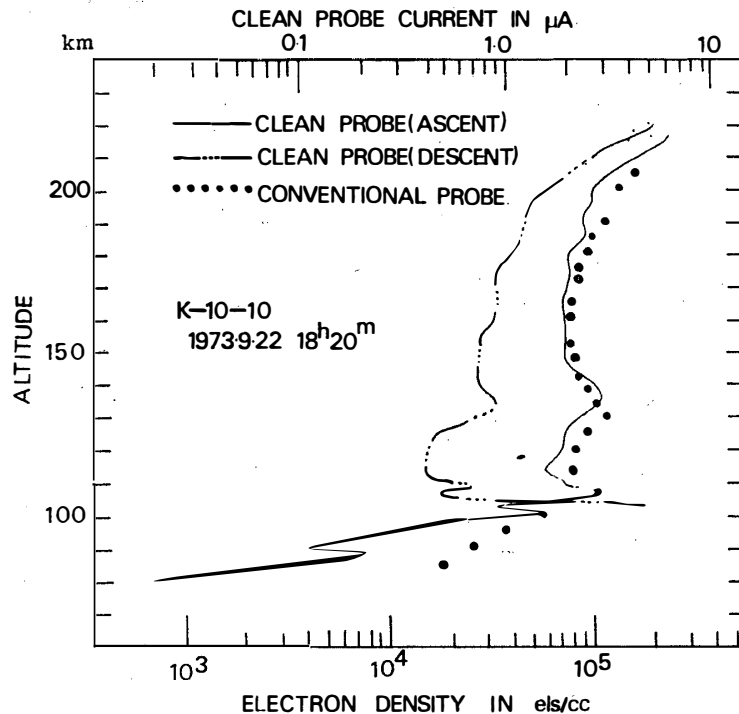


図 12 (b) Glass-sealed Langmuir probe と汚染電極による電子密度測定. 二つのプローブにより得られたプローブ電流は  $f_b E_s$  で規格化された.

Fig. 12 (b). Comparison of electron densities obtained by the glass-sealed Langmuir and by the uncleaned probe.

の結果である. 二つのプロファイルを  $f_b E_s$  で規格化すると, 汚染電極による電子密度プロファイルは, 高度 90 km 付近で, glass-sealed Langmuir probe の値より, 約 2 倍, 密度を大きく見積もる. 逆に密度の低い高度 90 km 付近で汚染電極による電子密度を glass-sealed Langmuir probe による値に fit させると, 汚染電極による値は, 高度 100 km 以上で正しいと思われる値の約 1/2, 少なく見積もられることになる.

## 5. 結 論

昭和基地上空における電離層プラズマの電子密度・温度の測定を計画する上において, 基本的に次のことが留意されなければならない. すなわち複雑な回路調整の必要がなく, かつ信頼できるデータが得られることである. このためには以下の測定 system を提唱したい.

- (1) 電子温度プローブによる高度 80 km 以上での電子温度測定.
- (2) 同時に D 層 chemistry の立場から詳細な高度プロファイルが必要とされる高度 60~

100 km の範囲では, glass-sealed Langmuir probe と  $10 \sim 10^6 \text{el/cc}$  の電子によるプローブ電流範囲をカバーするに足るログアンプの組合せによって連続観測を行ったのち, 高度 100 km 以上では, 掃引型ラングミュアプローブによる密度の絶対測定を行う。

## 文 献

- HIRAO, K. and K. OYAMA (1970): An improved type of electron temperature probe. J. Geomag. Geoelectr., **22**, 393-402.
- HIRAO, K. and K. OYAMA (1972a): A critical study on the reliability of electron temperature measurements with a Langmuir probe. J. Geomag. Geoelectr., **24**, 415-427.
- HIRAO, H. and K. OYAMA (1972b): Profiles of electron temperature in the ionosphere observed with electron temperature probe on a rocket. Space Res., **XII**, 1336-1339.
- HIRAO, K. and K. OYAMA (1973): Comparison of cleaned and uncleaned probes on board a rocket. Space Res., **XIII**, 489-492.
- REIFMAN, A. and W. G. DOW (1949): Dynamic probe measurements in the ionosphere. Phys. Rev., **76**, 987-988.
- 小山孝一郎・平尾邦雄 (1974): 汚染 DC ラングミュアプローブによる電子密度の評価について. 宇宙観測 Symposium 特集号, 東京大宇宙航研報告, **10**, 561-568.

### 付録1. 円筒プローブによる電子密度の測定

プラズマの Debye 長よりはるかに小さい径をもつ円筒プローブに流れる飽和電流は,

$$I_e = AN_e \cdot e (kT_e / 2\pi m_e)^{1/2} \cdot 2\pi^{-1/2} (1 + eV/kT_e)^{1/2}$$

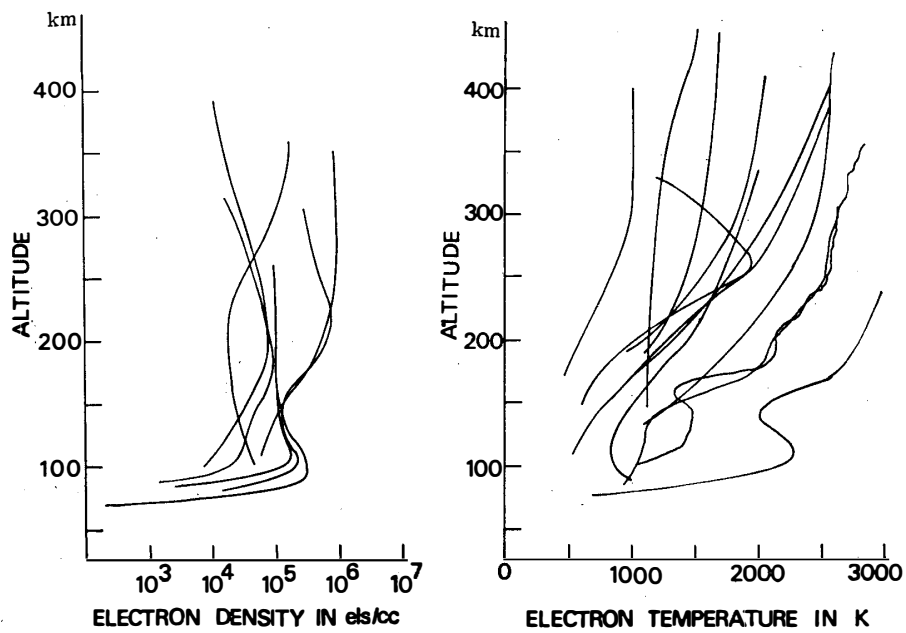
ここで  $I_e$ : 電子電流,  $m_e$ : 電子質量,  $e$ : 電子電荷,  $V$ : プローブ電圧,  $k$ : ボルツマン定数,  $A$ : プローブ表面積

であらわされる. 上式で  $(eV/kT_e) \gg 1$  なら

$$I_e = AN_e \cdot e \cdot \pi^{-1} (2eV/m_e)^{1/2}$$

となり, この式はプローブ電流はプローブに印加した電圧, および電子密度のみによって決定されることを示している. 従って, プローブ電流と印加電圧から電子密度を算出できる. 外国における電子密度は主にこの方法によって行われている.

付録2. 極地方における電子密度・温度のロケット実験のデーターをまとめたものを, 付図 1 に示してある.



付図1. 極地方における電子密度, 温度のロケットによるデーター. 図には昼夜の別なく一緒にまとめている.

*Appendix 1. Electron densities and temperatures in the polar ionosphere.*