Glass sealed Langmuir probeによる電子密度，温度の測定

小山孝一郎・平尾邦雄・竹口　晋

Measurement of electron density and temperature by means of a glass sealed Langmuir probe

By

Koh-ichiro OYAMA, Kunio HIRAO, Susumu TAKEGUCHI

Abstract: It seems to be a well known fact that ordinary (unclean) Langmuir probe gives erroneous result in the ionosphere study because of the contamination layer of the electrode surface. To get reliable information from Langmuir probe method, three means are considered; (1) the use of electron temperature probe, (2) to sweep the probe bias very quickly (rapid sweep Langmuir probe), (3) the use of glass sealed Langmuir probe.

As the first two were already discussed, this paper describes the third method "glass sealed Langmuir probe".

It is strongly recommended that glass sealed Langmuir probe should be used for the measurement of electron energy distribution of thermal components. The application of the glass sealed Langmuir probe to the electron density measurement is also discussed.

概　　要

通常用いられているＤＣラングミューアプローブでは電極表面に付着した汚染物質のために正確な情報を得ることができないことはよく知られた事実である。ＤＣプローブを用いて信頼できる電子温度，電子密度をもとめることは，(1)電子温度プローブ，(2)高速掃引の汚染ＤＣプローブ，(3)Glass sealed Langmuir probeの使用によって可能である。これらの方法のうち，(1)，(2)の方法については既に発表したので，本論文ではGlass sealed Langmuir probeについて述べる。Glass sealed Langmuir probeは電子温度，電子密度の測定はいうまでもないが，特に熱的電子のenergy 分布測定にその効果を発揮すると思われる。

1. はじめに

電離層プラズマの観測において，in − situ に電子温度，電子密度をもとめるものとして，ラングミューアプローブがあり，この方法は1947年，Leifman Dow [1] 等の先駆

This document is provided by JAXA.

的なV－2ロケットによるE層の観測にはじまって以来，多くの先輩達によって使用されてきた。

しかしながら，ラングミューアプローブ法の根本的な欠点は電極表面の汚れによってその測定があいまいになることである[2]。即ち電子温度に関しては汚染電極によって得られた値は正しい値より高く見積られ，電子密度[3]に関しては実際より低く見積られる傾向にある。このような電極表面の汚染による影響を除く為に前述のように

(1) 電子温度プローブ[4]

(2) 高速掃引電圧型のLangmuir probe

(3) Glass sealed Langmuir probe[5]

の使用が考えられる。

電子温度プローブ，高速sweep Langmuir probe については前に報告したので，ここではGlass sealed Langmuir probe の開発とその電離層プラズマ計測への応用について述べる。Glass sealed Langmuir probeとは，電極を地上で高温に加熱し高真空で排気することによって，Langmuir probe による情報が満足な観測精度をもつまでに，電極表面をきれいにしてガラス管に封入したのち，vehicle が電離層プラズマにはいってから，封入したガラス管を破壊して，プラズマパラメータを測定しはじめるもので，S－210－7 号機により，その性能がテストされ，K－10－10号機ではGlass sealed Langmuir probe により得られた電子密度プロファイルは汚染電極により得られた電子密度プロファイルと合わせて電極表面の汚染が電子密度測定に及ぼす影響が議論された。ここに至ってGlass sealed Langmuir probe の有用性がほぼ確立されたと思われ，K－9M－45 号機では，二次高調波法によって熱的電子のエネルギー分布を測定するに至った。

以下において第2節はGlass sealed Langmuir probe そのものの構造に関するものであって，第3節はGlass sealed Langmuir probe により得られた実験結果の報告である。

Glass sealed Langmuir probe の Space plasma への応用にあたって，Vehicle body，即ちCounter electrodeの表面汚染のLangmuir probe 測定におよぼす影響の有無を議論するために更に一節をもうけた。

2. Glass sealed Langmuir probe

数回の環境試験を経て，規定された加速度，振動に耐えうるように設計されたGlass sealed Langmuir probeの製造過程は図1に示されている。直径3㎜長さ200㎜のステンレススティールの丸棒を封入したガラス管は約200℃で加熱しながら約10時間超高真空装置で排気した後chip off される。chip off されたGlass sealed Langmuir probe はVehicle が電離層へはいった時図2に示すようなカッターでガラス管の根本に強いshockを加えることによってガラス管を破壊する。このようにしてきりはなされたガラス管はプローブの展張と共にロケットのSpin によって生じる遠心力によってロケットからとびさり，最終的に電極がプラズマにひたされることになる。

This document is provided by JAXA.

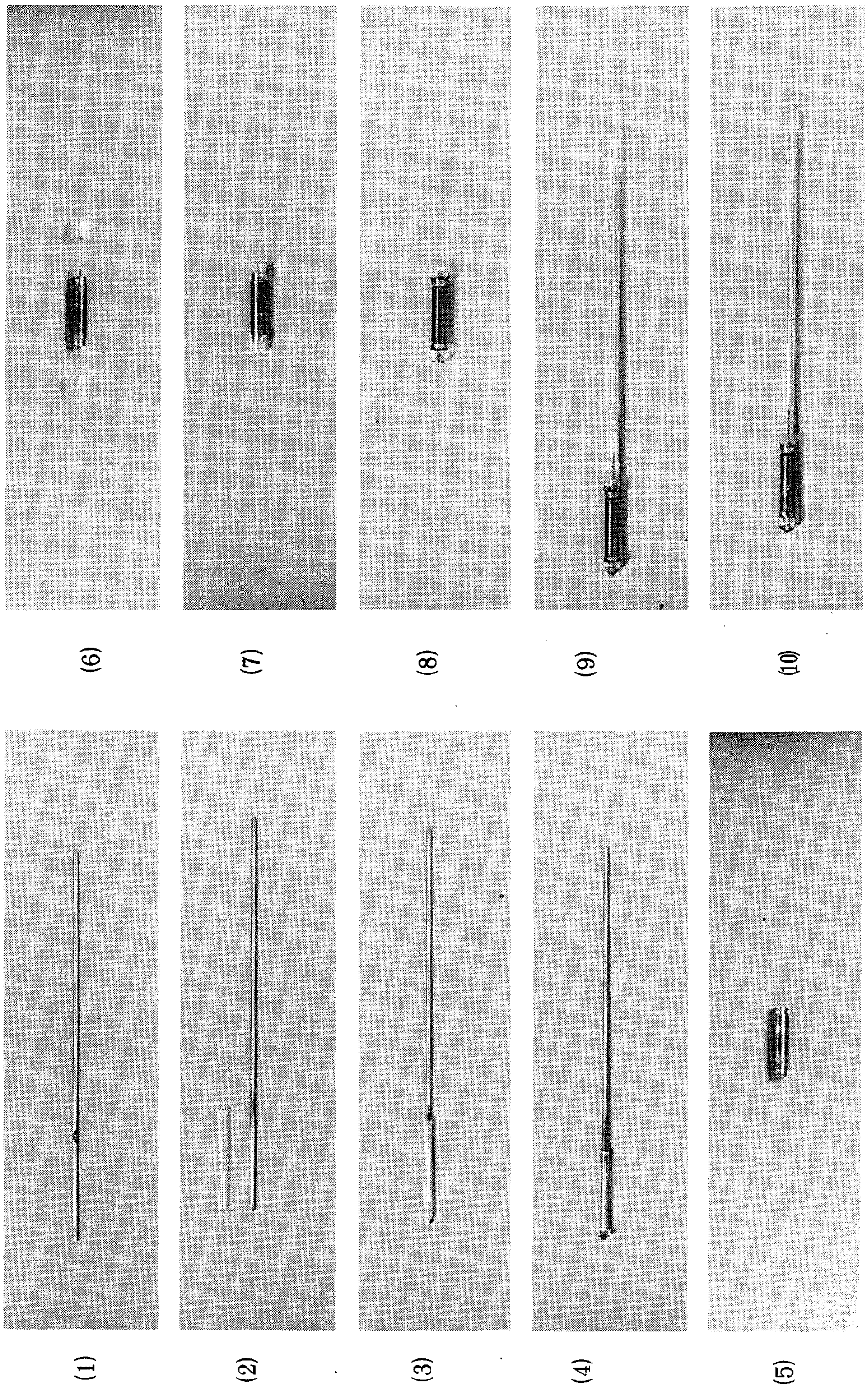

図1. ガラス管封入型ラングミュープローブの製作

左上より(1)，3φ×200ℓのステンレススティール棒を40ℓ×3φのコバール棒にアルゴン溶接する。(2)(3)(4)，上記の電極にガラス管をかぶせる。(5)(6)(7)(8)，プローブの支持部をつくる。(9)，(4)までの過程で出来あがった電極を支持棒に通し，支持棒と電極をガラス溶接する。(10)，(8)までの過程でできあがったプローブは約300℃で10時間〜20時間加熱しながら排気し，最後にチップオフする。

This document is provided by JAXA.

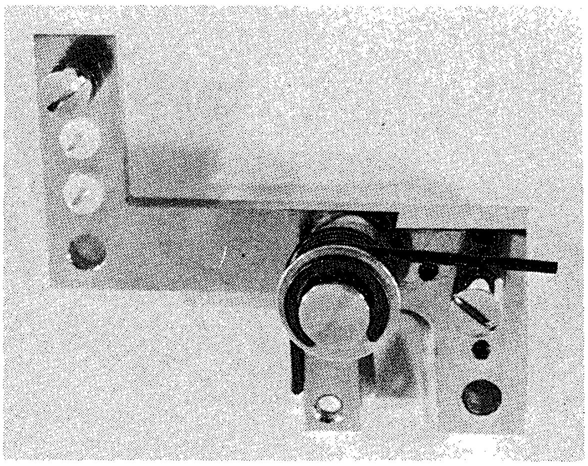

図2. プローブのガラス管をきるためのカッター

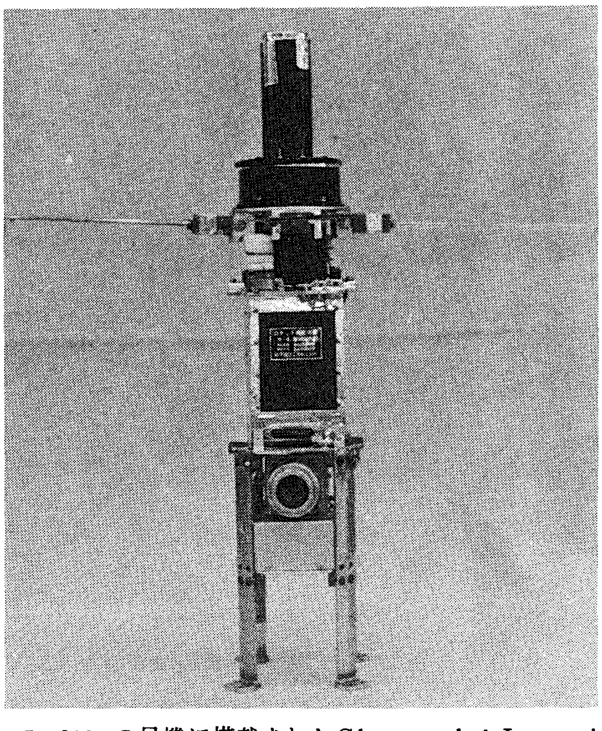

図3. S－210－7号機に搭載されたGlass sealed Langmuir probeの測定器，probeに印加された電圧波型は三角波である。

3. 電離層プラズマにおけるGlass sealed Langmuir probe

Glass sealed Langmuir probeを使用したロケット実験は過去三回成功した。表1は三回の実験に関する簡単なまとめである。

This document is provided by JAXA.

表1　Glass sealed Langmuir probe による実験

Vehicle名	実験実施日	到達高度	備　　考*
S−210−7	1972・FEB・17	115 km	Glass sealed Langmuir probe の性能テスト
K−9M−45	1974・JAN・16	330 km	二次高調波法による電子エネルギー分布の測定
K− 10 −10	1973・SEP・23	220 km	電子温度，イオン温度，中性温度の同時測定

* 備考欄は本論文に関連すると思われる事柄の記述である。

3.1　S−210−7 号機による電子温度の比較測定

本ロケットによってはじめてGlass sealed Langmuir probe の性能が確認された。プローブ電圧は周期1秒，振巾3Vの3角波である。前述のように直径3㎜長さ20cmのGlass sealed Langmuir probe及び，これと同じ材質，寸法のはだかのままの電極に流れこんだ電流はGainのほぼ同じDC amp．によって増巾されテレメータにおくられた。得られた電圧電流特性のセミログプロットによって電子温度が計算された。二つのプローブによる電圧電流特性の一例が図4に示されている。これによるときれいなプローブにおいては，電子温度はプローブ電圧の掃引の方向によらず同じである。一方汚れたプローブによる電子温度はきれいなプローブによる電子温度より高く，かつ，プローブ電圧の掃引の方向によって異った値をとる。二種のプローブにより得られた電子温度は図5にまとめてある。即ち一般的によごれたプローブで得られた電子温度はバラついており，ガラス封入型プローブのそれはばらつきが少い。*

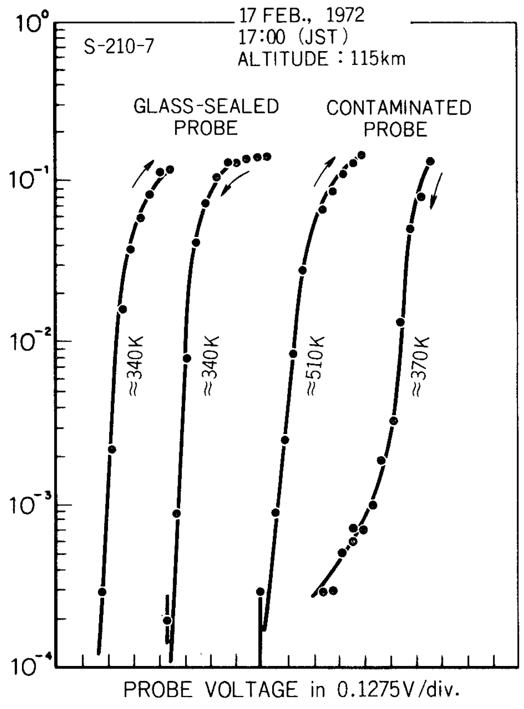

図4　ガラス管封入型ラングミューアプローブとよごれたプローブによる電圧電流特性。よごれたプローブによる電子温度はプローブ電圧の掃引方向によって二つの温度を有する。

* ここで"きれいなプローブ"に対してつかわれる"汚れたプローブ"とはglass sealしてないふつうに使われている電極のことで通常Aceton等でふいて用いるが，信頼できるプローブ特性を得るためには化学的な処理は効果がない。

This document is provided by JAXA.

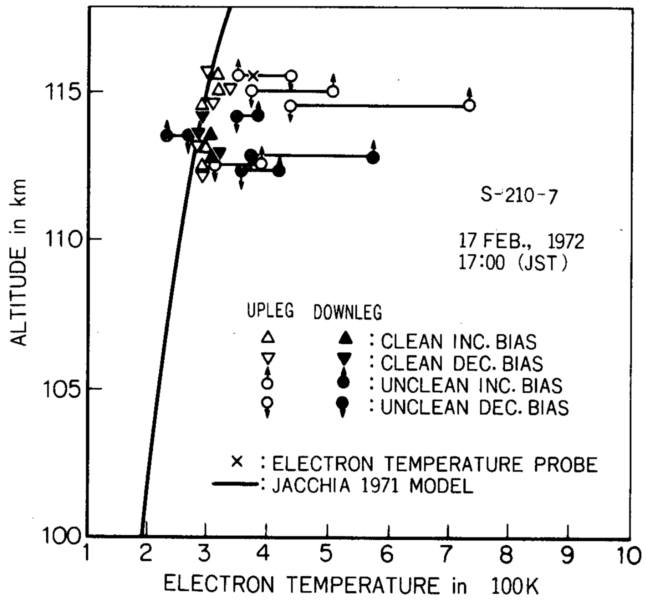

図5. ガラス管封入型プローブ，ラングミューアプローブによる電子温度測定結果，実線はJacchia 1971年の大気モデルTex = 700 による。

3.2 K－10－10号機による電子密度，電子温度の測定

K－10－10号機においては高度100 km～160 km において電子温度プローブによる電子温度，流れプラズマでの円板のしゃへい効果[6]を利用するイオン及び中性温度の同時測定，高度220 kmにおいては電子温度プローブとGlass sealed Langmuir probeによる電子温度の比較測定が行われた。図6はこれらの結果をまとめたものである。

更にK－10－10号機では汚染電極とGlass sealed Langmuir probeによる固定バイアス法による電子密度の比較測定もなされ，その結果が図7に示されている。二つのプローブによるプロファイルはアイオノグラムのfbEsで規格化された。注目すべきことは高度100 km以下において，よごれたプローブによる電子密度はきれいなプローブによる電子密度より約2倍高くみつもられていることである。この両者の違いはプローブ表面の汚れを考慮すると容易に説明できる。

3.3 K－9M－45号機による電子温度の測定

本ロケットによって電極表面の汚れの影響をうけずに信頼できる値を与える電子温度プローブとGlass sealed Langmuir probeとによって電子温度が得られた。図8に示すように高度130 km以上では両者の一致はきわめてよいといえる。高度100 km～130 kmでの両者の差は電子のenergy分布のひずみにより生じたものと考えられる[7]，[8]。

This document is provided by JAXA.

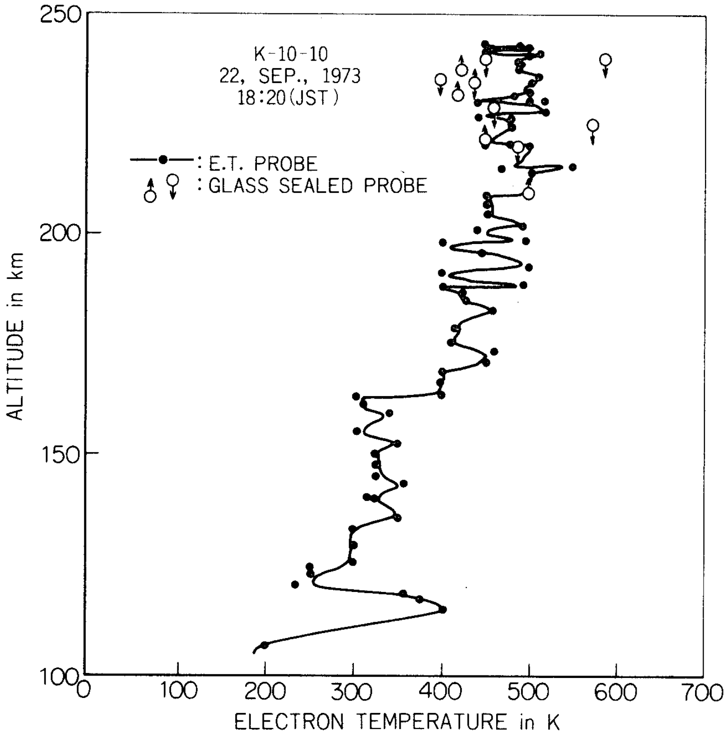

図6.
K－10－10号機による電子温度プローブ，Glass Sealed Langmuir probe により得られた電子温度
♀はプローブ電圧を0から+3Vへ，♂は+3Vから0へ掃引した時に得られた電圧電流特性からの電子温度である。

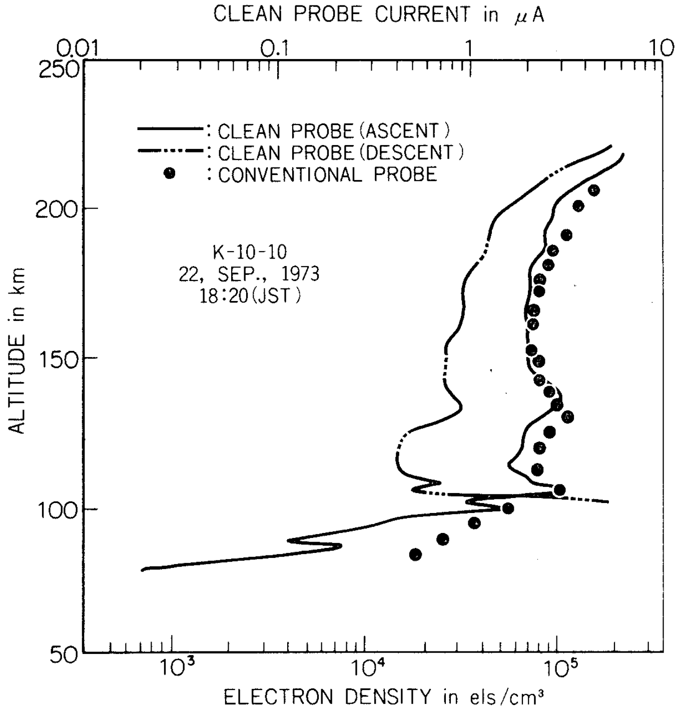

図7.
K－10－10号機において，よごれたプローブと，Glass Sealed Langmuir probe による電子密度の比較がなされた。二つのプローブ電流は fb Es で規格化された。
100km 以下においてよごれたプローブは密度を高くみつもることがわかる。

This document is provided by JAXA.

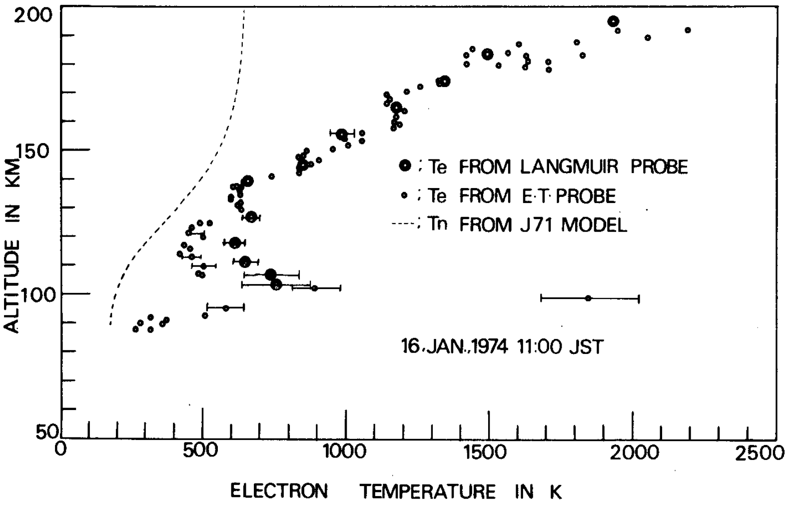

図8. K－9M－45 号機による結果。電子温度プローブによる電子温度と，Glass sealed Langmuir probe を使った二次高調波法により得られた二次高調波成分をセミログプロットして得られた電子温度の比較。高度130km 以下でのちがいは，二つの温度からなる電子群によるものと思われる。

4. Vehicle (Counter electrode)表面の汚染について

室内実験においてはCounter electrodeは通常加熱されたカソードであり，Counter electrodeの表面汚染には注意を払わなくてよいように思われる。しかしながらSpace plasmaにおいてはCounter electrodeは，よごれたロケットボディであってプローブ表面の汚れによる容量に較べてその大きな表面積の故にきわめて大きな容量をもっことが容易に推察される。*脚注 このようにcounter electrodeが大きな容量をもつ場合，単にGlass sealed Langmuir probe の使用によって表面汚染の影響をとりのぞくことができるか否かはきわめて大きな問題である。ここではこの問題について検討を加える。

高速掃引型ラングミューアプローブのように正しい電子温度を与えることができる条件はプローブ電圧の掃引時間内にプローブ表面の電位の変動がないことである。即ち実際に印加したプローブの掃引電圧を V_p ，実効的に汚れ層を通してよごれ層の表面に印加される電圧をVeff とすると

正しい情報を与える条件は

$$dV_p/dt \gg d(V_{eff}-V_p)/dt$$ である。

上記の条件は $V_{eff} \approx V_p$ 即ち，よごれ抵抗による電極表面の電位降下がほとんどない時，

*脚注 K－9M－29 号機はロケット電位は時間の経過と共に徐々に上昇しつづけた。このことはロケット表面の容量がきわめて大きいことを示していると思われる。

This document is provided by JAXA.

あるいはプローブ電圧の掃引速度 dV_p/dt より，プローブ表面の電圧降下の変動 $d(V_{eff}-V_p)/dt$ がきわめて小さい時になりたつ。この場合図9に示すようにロケット表面の汚れによる電位降下を V_R とするとき

もし　$dV_R/dt \ll d(V_{eff}-V_p)/dt \ll dV_p/dt$ であれば

ロケット表面の汚れによる電位の変動は無いと考えてよい。

実際にはプローブおよびロケットに流れこむ電流とそれぞれの電圧変動との関係は

$$i/C_p = dV_p/dt \text{ および } i/C_R = dV_R/dt$$

で通常

$$C_R \gg C_p \text{ ゆえ } dV_p/dt \gg dV_R/dt \text{ となり，}$$

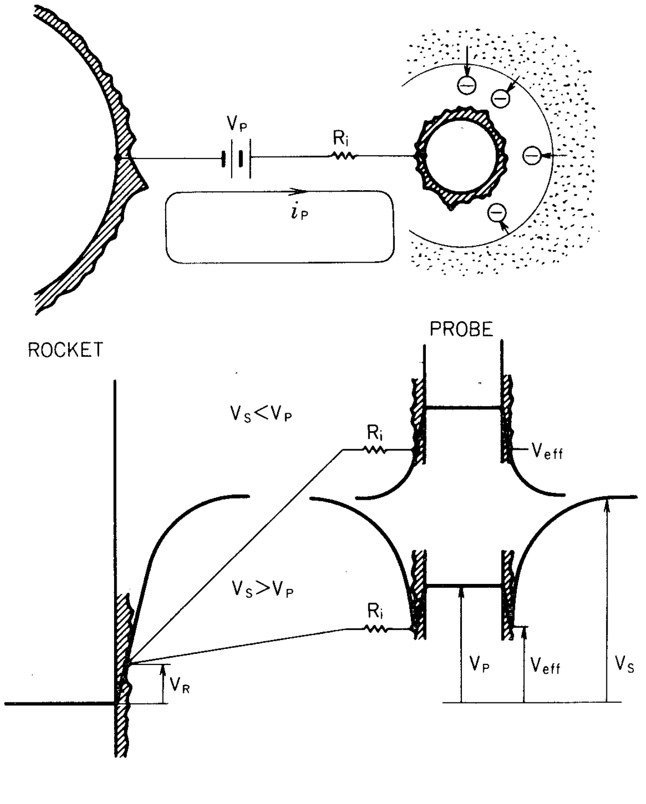

図9.　ロケットボディおよび電極が汚染されている場合の電位分布 V_p は実際に電極に印加した電圧，V_{eff} は，実質的にプラズマと電極間に印加された電圧で，まわりのプラズマ電位に対してプローブ電圧が正，負の場合を示してある。

This document is provided by JAXA.

従ってロケットボディの汚れの影響は考えなくてよいことがいえる。S－210－7号機による結果，およびK－9M－45 号機，K－10－10号機による結果はこの考え方が正しいことを示しているように思える。

5. Clean 電極の再汚染について

室内でGlass sealされた電極がプラズマ中にひたされたのち，再びまわりの物質によって汚染されることなく，正しい値を与えることができるかは，Glass sealed Langmuir probeが有用であるか，否かの大問題である。これに関して土手氏[9]の実験結果が解答を与えているように思える。図10にみるように，汚染電極がボンバードされはじめ，最終的に電極表面がきれいになったと思われるころにボンバードを停止する。ボンバードされた直後の電極は約10分以内では電極表面の状態はかわらないとみてよいと思われる。また我々の実験によればきれいにされた電極を数分大気にさらして，しかる後プローブ特性をとっても，深刻な電極汚染の影響はみられなかった。従って上記二つの実験事実からGlass sealed Langmuir probe がプラズマ中にひたされた後，深刻な再汚染は考えられないこと，また最悪の場合，ロケット打上げのショック等でガラス管がこわれ電極が大気にさらされても，ロケットが飛しょう中のみじかい時間には深刻な電極汚染はすすまないであろうことが考えられる。

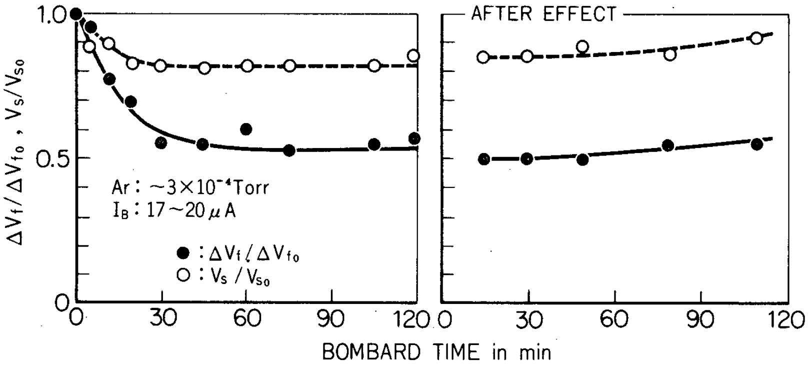

図10　ボーバード後の電極表面の状態，ΔV_f はプローブ電圧の掃引方向によってちがうプローブカーブのフローティング電圧の差，ΔV_{fo} はボンバードしない時のプローブカーブのフローティング電圧の差，V_s，V_{so} はボーバード前，後のスペースポテンシャルである。

6. むすび

Glase sealed Langmuir probe は特に二次高調波法による thermal な電子のエネルギー分布を測定するのに適していると思われる。またこのプローブは空間的な微細構造を持つことのあるEs layer 中の電子温度，電子密度の測定に利用できる。

This document is provided by JAXA.

7. 謝　　辞

プローブの開発にあたり，中川氏をはじめとする工作工場の方々，数回にわたる環境試験には平田・中田両氏の御尽力，またGlass sealed Langmuir probeの電離層プラズマ計測への応用は，ロケット実験を遂行された宇宙工学の諸氏，関係諸機関の協力によってなされた。S－210－7号機，及びK－9M－45号機に搭載された測定器は松栄電子株式会社，田村・久保両氏の設計，調整によるものである。

1974年11月29日　新設部（科学）

参 考 文 献

[1] Leifman, A and W.G. Dow, Dynamic probe measurements in the ionosphere, Phys. Rev., 76, 987–988, 1949.

[2] Hirao, K. and K. Oyama, A critical study on the reliability of a contaminated Langmuir probe, J. Geomag. Geoelectr., 24, 415–427, 1972.

[3] 小山孝一郎，平尾邦雄；電子密度測定における，プローブ表面のよごれについて，宇宙観測特集号，1974年

[4] Hirao, K. and K. Oyama, An improved type of electron temperature probe, J. Geomag. Geoelectr., 22, 393–402, 1970.

[5] Hirao, K. and K. Oyama, Comparison of clean and unclean probes on board a rocket, Space Res., X, 1972.

[6] 佐々木，村里，小山，河島，平尾；イオン，中性，電子温度の同時測定，宇宙観測特集号，1974年

[7] 小山孝一郎，平尾邦雄；Dynamo 領域における電子温度について，宇宙研報告，8，1026－1036，1972年

[8] 小山孝一郎，平尾邦雄；電離層プラズマ中電子のエネルギー分布，宇宙観測シンポジウム，1974年

[9] 土手敏彦；スペースチャンバープラズマにおけるプローブのクリーニング効果，スペースプラズマ研究会　40－44，1972

This document is provided by JAXA.