

観測ロケット搭載用高速ラングミュアプローブの開発と性能評価

阿部 琢美 (宇宙航空研究開発機構)

1. はじめに

我々は宇宙科学研究所にある大型スペースチェンバーを用いて、観測ロケット搭載用ラングミュアプローブの開発を行っている。ラングミュアプローブはプラズマの基本パラメータである電子温度、電子密度等を測定する機器として古くから用いられてきたが、電離圏を飛翔する観測ロケットや人工衛星に現在も搭載され貴重なデータを提供し続けている。

ここ数年の我々の活動としては大きな新規開発要素は少なく、観測ロケット搭載用の測定器を飛翔する空間で予想されるプラズマ密度に合わせた電流利得に設定し、大型スペースチェンバーに設置して飛翔前の動作確認試験および校正用データの取得を行ってきた。

平成 22 年度は、23 年度夏期に打ち上げ予定の観測ロケット S-520-26 号機および冬期に打上げ予定の S-310-40 号機に電子温度・密度の測定を目的として搭載されるラングミュアプローブ (FLP)、また電子密度擾乱の測定を目的として S-310-40 号機に搭載される固定バイアスプローブ (FBP) の動作確認および校正試験を大型スペースチェンバーにより行った。本稿ではこれらの試験の形態と結果について述べるとともに、近年の観測ロケット実験で得られたラングミュアプローブのデータについても紹介を行うこととする。

2. 測定器概要

我々が観測ロケット搭載用として用いているラングミュアプローブでは直径が 3 mm、長さが約 20 cm のステンレス製円筒型電極を探針として用いている。このプローブは表面の電極汚染を除去するため (後述)、クオーツランプヒータにて熱照射を行い、脱ガスにより汚染が十分に除去されたと判断された後にガラス封じされる。このようにして製作されたプローブはロケット頭胴部に搭載され、打ち上げ後のロケットノーズコーン開頭後にタイマーによりガラスを破壊し、電極がプラズマ中に露出される。その直後にプローブはロケットが形成するショックやウエークの影響を極力避けるよう機軸から直角方向に伸展され、測定を開始する。

プローブに印加する電圧は、ロケットの速度や予想される電位、電子温度等を考慮して決定されるが標準的な諸元は次の通りである。

観測ロケット搭載用ラングミュアプローブの主な諸元

プローブへの印加電圧 :	振幅 3V、周期 200 msec の三角波電圧
データレート :	3200 sample/秒 (640 点/sweep)
プローブ電流出力 :	低利得・高利得の 2 チャンネル。電流値を電圧に変換し、12 ビットで出力。但し、電子電流に加えイオン電流を測定できるように +1 V のオフセット電圧を設定。

3. 大型スペースチェンバーでの性能確認／校正試験

大型スペースチェンバーを用いたラングミュアプローブの性能確認試験、校正試験は次のようにして行う。

- 1) スペースチェンバー内にラングミュアプローブと固定バイアスプローブ、およびそれらのプリアンプを設置する。
- 2) 十分な真空度に達した状態で、チェンバー内の可動アームに取り付けたラングミュアプローブ電極を熱照射用ランプ近傍に移動した後にランプを点灯し、電極を熱して表面上の汚染を除去する。除去後はプローブの位置をチェンバーの中心に移動する。
- 3) 後方拡散型プラズマ源を用いて下部電離圏中の電子密度($N_e=10^4 \sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$)に近いプラズマ環境を大型チェンバー内に生成する。
- 4) スペースチェンバーの外側の電気回路部から所定の電圧をラングミュアプローブと固定バイアスプローブに印加し、出力電流情報を得る。この際、電流出力値はチェンバーのフランジを経由して取り出し、パソコンに取り込むようにする。
- 5) ラングミュアプローブの電圧-電流特性から電子温度と電子密度を算出する。これらから所期の性能が得られているか、精度良い温度・密度推定を妨げるような信号の干渉が存在しないかの確認を行う。
- 6) 電子温度が既知の場合、固定バイアスプローブで得られた電流から電子密度が推定できる。この値とラングミュアプローブデータから推定される電子密度値を比較し、整合しているか否かの検討を行う。整合していない場合には、その差について考察する。

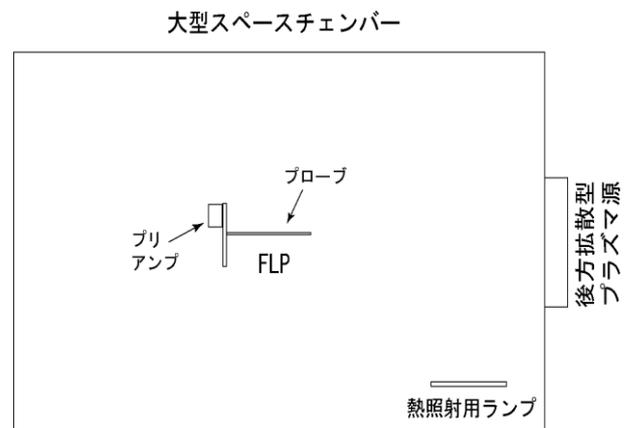


図1. スペースチェンバー内の配置

4. ランプ照射によるプローブ表面の汚染除去

正確な電子温度測定を妨げるプローブの電極表面の不純物による影響を避けられるよう、次のような手法 (Oyama and Hirao, 1976) でプローブを真空ガラス封じとした。

- 1) ステンレス製プローブをやすりで磨いた後、アルコールで洗浄。
- 2) 直径 10mm のガラス管にステンレスプローブを封入し、排気系システムのフランジにガラス管を取り付け、真空引きを行う。
- 3) 熱照射ランプを点灯し、プローブの温度を 100°C 以上に保ちながら 24 時間真空引きを行い、表面の汚染物質を除去する。
- 4) この高真空で排気した状態でガラス管を封じ、表面汚染の無い状態でロケット打ち上げまで保管する。

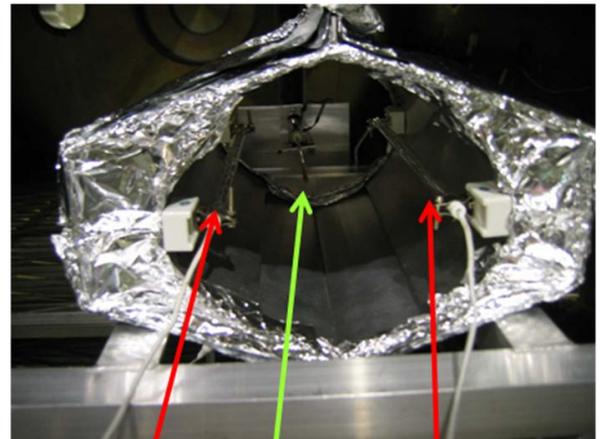
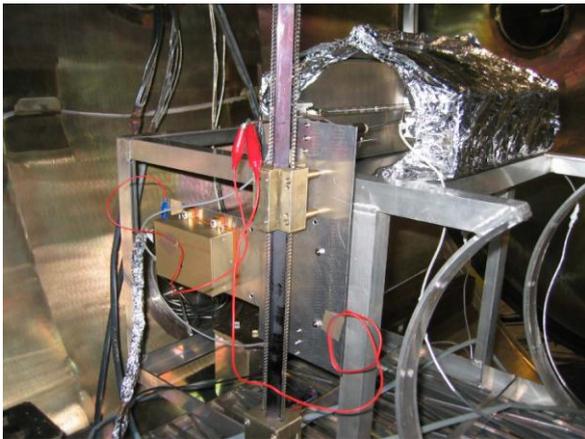


図2. プローブ表面汚染除去の様子。左は3軸可動アームを移動し、ランプに近づけたところ。右は照射時のランプとプローブの相対位置を示す。

プローブ
ランプ (クォーツランプヒータ) ランプ

5. 試験時に取得したデータとフィッティング

ラングミュアプローブの動作確認試験において得られたプローブの電流電圧特性を図3に示す。図において左側の列はプローブ電流を直接表示した（縦軸は任意スケール）もので、5 1は電流値が±0、電子電流をプラスの値に（マイナスの数値はイオン電流）とっている。イオン電流と考えられる部分には直線でフィッティングを行なっている。右側の列は左側に示したプローブ電流から直線で近似したイオン電流を差し引き、電子電流を対数目盛りで表示したものである。この図において直線部分にフィッティングした時の傾き（図に直線で表示）から電子温度（この場合約 756 K, 695 K 等）が求められる。

電子密度に関しては、電子密度の飽和電流付近にフィッティングした直線と電子温度を求める際にフィッティングした直線との交点における電流値から求めるという方法を用いた。これらの直線が各々の図に描かれている。

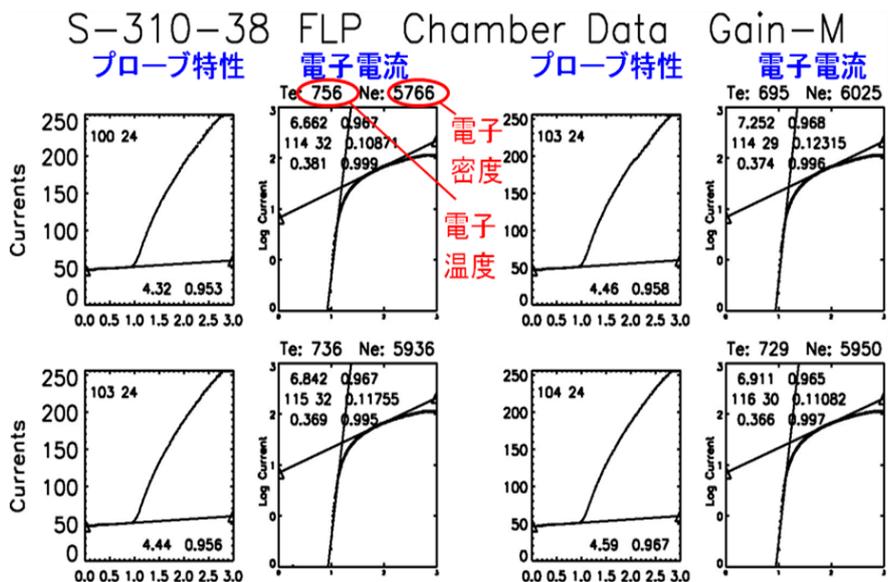
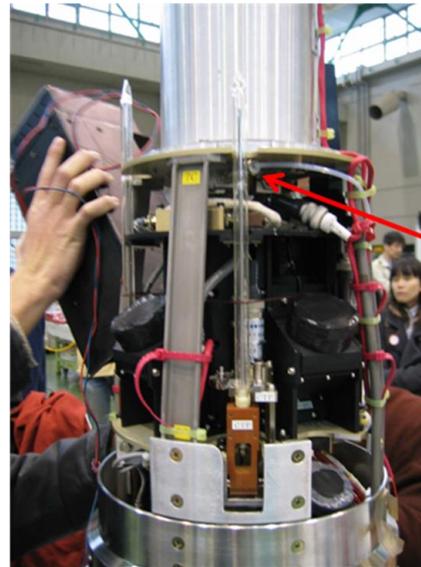


図3. チェンバーでの実験で得られた電流電圧特性（横軸はスイープ電圧）
 左：プローブ電流のリアスケール表示。イオン電流に直線でフィッティングしている。
 右：電子電流（プローブ電流からイオン電流を差し引いたもの）を縦軸対数スケールで表示。直線部分にフィッティングして求めた電子温度を上部に記した。

6. 観測ロケット搭載のラングミュアプローブと取得データ

ラングミュアプローブが実際に観測ロケットに搭載された様子を右下の写真に示す。位置は開頭部と呼ばれノーズコーンが開いた時に大気に露出される部分である。ガラス封じプローブは機軸よりもやや内側を向くように取り付けられ、打ち上げ後にタイマーにてガラス割りが行われ、機軸に直角方向に展開されると遠心力によりガラス管が外部に放出される。展開後はプローブのほぼ全面がロケット機体の外部に位置するようになる。

図5は観測ロケットS-310-33号機に搭載されたラングミュアプローブが取得した電圧-電流特性で、時刻は不等間隔に数秒おきに取得されたデータである。各図(a-g)左列においてプローブ電流が増減しているのは、この時間帯において電子密度が大きく変化していたためである。右列の電子電流の片対数プロットではおよそ 10^2 のレベルまで電流値が直線になっていることは熱的電子がマクスウェル分布をしていたことを意味している。電子温度は概ね $1000 \sim 1100$ K であるが、電子密度が低い領域である b と f においては電子温度が $1770 \sim 2000$ K 程度の高い値になっていたことがわかる。



ラングミュア
プローブ(ガラ
ス封じ後)

図4. 観測ロケ
ットに搭載さ
れたプローブ

7. まとめ

我々は大型スペースチェンバーを用いて観測ロケットに搭載する電離圏プラズマ測定用ラングミュアプローブ、固定バイアスプローブの最終機能確認試験を行っている。チェンバーを用いた試験は機能確認の目的の他、測定精度のクロスチェックにも有用である。本試験を経た後に、観測ロケットに搭載され良好なデータを取得し続けている。

8. 参考文献

[1] Oyama, K. I. and K. Hirao, Application of a glass-sealed Langmuir probe to ionosphere, Rev. Sci. Instrum., 47, 101-107, 1976.

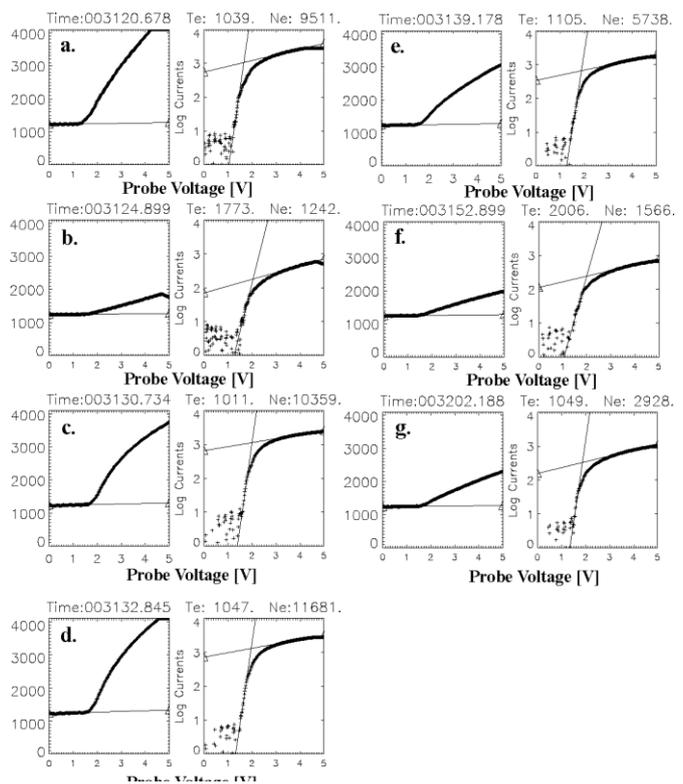


図5. 観測ロケットS-310-33号機搭載ラングミュアプローブで取得された電圧-電流特性