

観測ロケット S-310-40 号機・S-520-26 号機搭載 FLP・FBP の校正試験

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。

平成23年度は冬期に打ち上げ予定の観測ロケット搭載S-310-40号機に搭載するFLP (ラングミュアプローブ) とFBP (固定バイアスプローブ)、S-520-26号機に搭載するFLP (ラングミュアプローブ) を大型スペースサイエン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た。FLPは電離圏中の熱的電子の温度と密度の測定を、FBPは電離圏中の電子密度擾乱の測定をそれぞれ目的としている。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、実際に観測ロケットに搭載して飛翔中に得られたデータの一部についても紹介を行うこととする。

2. 測定器概要

我々は直径が3 mm、長さが約20 cmのステンレス製円筒型電極を観測ロケット搭載用ラングミュアプローブの探針として用いている。このプローブは、1) 表面の電極汚染を除去するため、ガラス管で覆った状態で排気装置にて真空引きを行いつつ、クォーツランプヒータにて電極表面に熱照射を行い、表面からのアウトガスを逐次排出、2) アウトガスの傾向が十分に落ち着き、表面汚染が除去されたと判断された後にガラスを封じ、真空状態を保持、の過程により製作される。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真空封じ用のガラスを破壊し、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今回の実験に用いたFLPやFBPに適用された標準的な諸元は次の通りである。

- 観測ロケット搭載用FLP (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、掃引周期200 msecの三角波電圧
 - データレート： 3200 サンプル/秒 (640 サンプル/掃引)
 - 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+1Vのオフセット電圧を設定。
- 観測ロケット搭載用FBP (固定バイアスプローブ) の主な諸元
 - プローブへの印加電圧： センサー1：+3V、センサー2：+5V
 - データレート： 1600 サンプル/秒 (センサー1, 2共通)
 - プローブ電流出力： 各センサーにつき低利得・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、フルスケールが低利得20 μ A、高利得1 μ Aになるように利得を調整。

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、固定バイアスプローブの性能確認試験、校正試験は次のようにして行った。

- 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) 排気系を起動し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、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。

大型スペースチェンバー

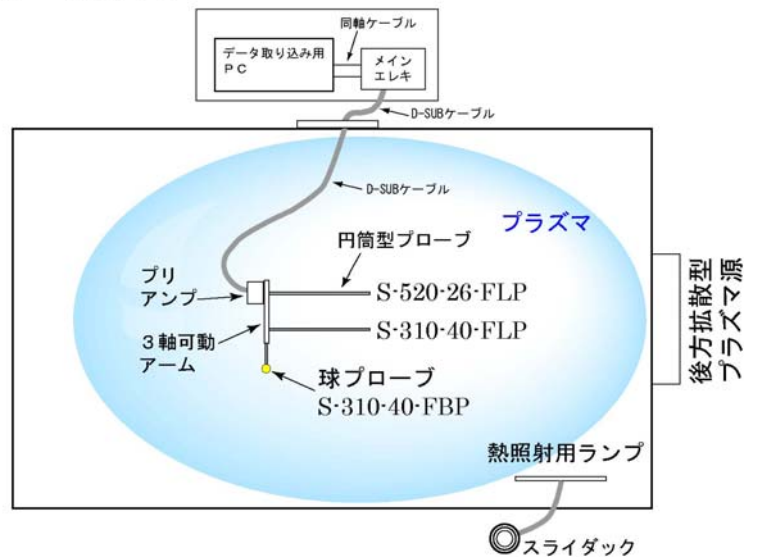


図1. スペースチェンバー内の機器配置

- 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ラングミュアプローブには三角波電圧、固定バイアスプローブには正の一定電圧を印加し、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經由して取り出し、チェンバー外に設置したパソコンで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

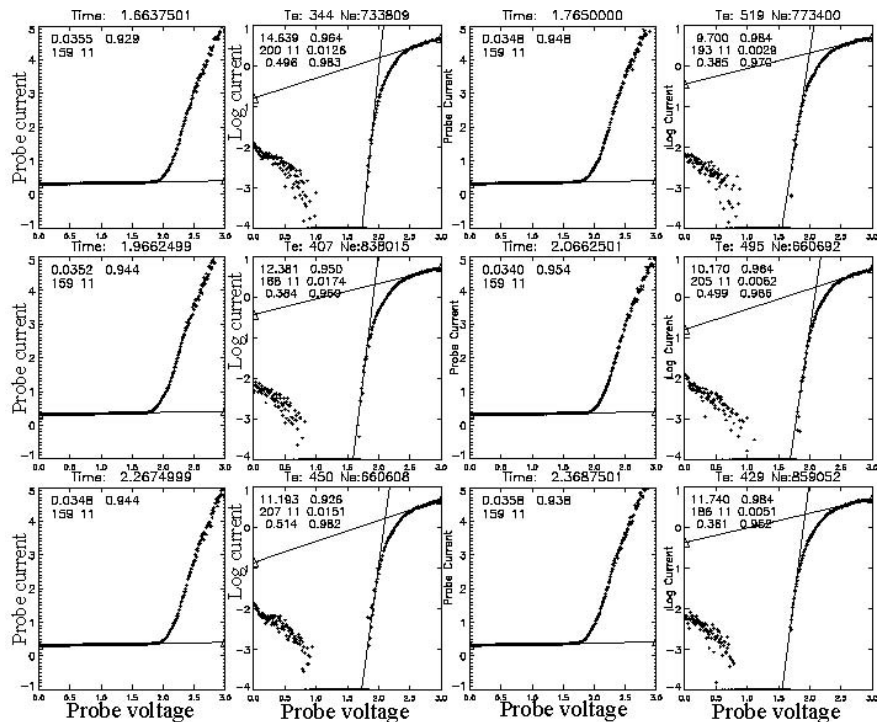


図2. チェンバーでの実験で得られた電流電圧特性（横軸はスイープ電圧）

左から1、3列目：プローブ電流のリニアスケール表示。イオン電流に直線でフィッティングしている。

左から2、4列目：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。

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) 電子温度と電子密度が既知の場合、FBPで測定される電子電流を理論的に計算出来る。この値と実際にFBPで得られた電子電流値を比較し、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。

4. 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2に示す。図において左から1, 3列目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、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。2, 4列目は1, 3列目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。

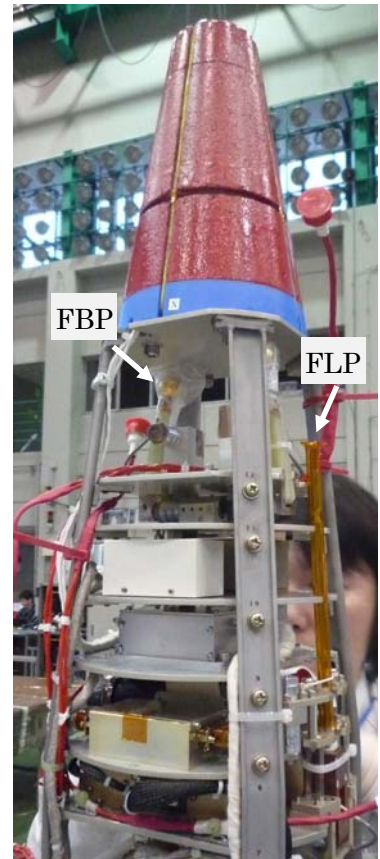


図3. 観測ロケットに搭載されたFLPとFBP

5. 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図3の写真に示す。位置は開頭部と呼ばれノ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。固定バイアスプローブもロケットの打ち上げ後に水平方向に展開され、機体外部で計測出来るように設計されている。

図4は観測ロケットS-310-40号機に搭載されたラングミュアプローブが取得した電流-電圧特性で、時刻は不等間隔に取得されたデータである。図2同様に左列にはプローブ電流のリア線表示、右列には電子電流のセミログプロットを表示しているが、およそ $10^{-1} \sim 10^{-3}$ の範囲で電流値が直線的に変化していることは熱的電子がほぼ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500~800K、電子密度は $6 \times 10^3 / \text{cm}^3$ 前後の値であった。

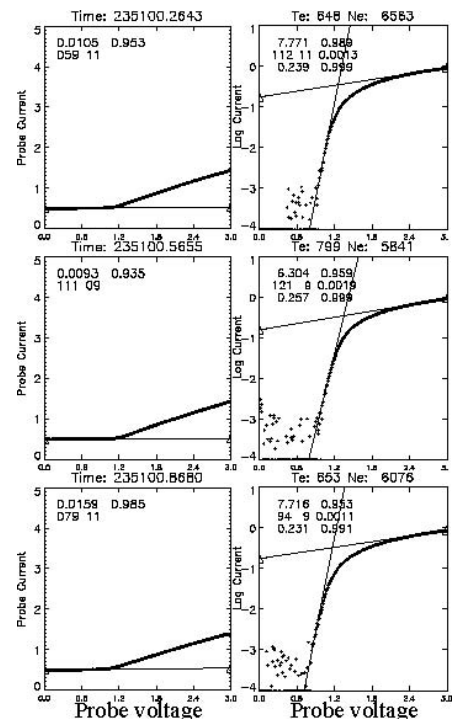


図4. FLPで取得された電圧-電流特性とフィッティング

6. FLPとFBPの測定データの比較

FLP観測から電子温度、電子密度が求められれば、FBPで測定されるべき電流値を計算により求めることが出来る。言い換えれば、両者のデータを比較することにより2つの測定器の妥当性を検討することが出来る。ここではスペースチェンバー内で得られたS-310-40号機搭載FLPのデータとFBPのデータの比較について報告する。

時刻	大気圧 [Pa]	S-310-40-FLP 測定値			FBPプローブ電流					
		電子温 度[K]	電子密 度[cm ⁻³]	熱拡散 電流 [μA]	理論値		実測値 (オフセット考慮)		理論値/実測値	
					+3V	+5V	+3V	+5V	+3V	+5V
15:36	1.37E-02	664.2	710758	1.146	4.924	8.373	1.928	3.840	2.554	2.181
15:51	1.23E-02	498.4	855056	1.194	5.884	10.050	1.812	3.536	3.247	2.842
15:59	1.04E-02	400.6	1003076	1.256	6.874	11.773	1.600	3.208	4.296	3.670
16:07	8.96E-03	432.7	762985	0.993	5.236	8.959	1.440	2.856	3.636	3.137
16:21	7.85E-03	429.4	653182	0.847	4.260	7.542	1.348	2.648	3.160	2.848
16:29	6.98E-03	619.5	492545	0.767	3.240	5.703	1.280	2.420	2.532	2.357
16:41	6.14E-03	583.7	403182	0.609	2.505	4.586	1.124	2.148	2.229	2.135
16:43	5.15E-03	711.4	246727	0.412	1.543	2.812	0.828	1.852	1.863	1.518
16:53	4.27E-03	949.8	160818	0.310	0.958	1.807	0.591	1.500	1.621	1.205
17:00	3.08E-03	977.9	71599	0.140	0.427	0.805	0.367	0.942	1.163	0.855
17:12	6.15E-03	825.5	24807	0.045	0.173	0.293	0.099	0.388	1.754	0.755
17:20	4.27E-03	577.6	5272	0.008	0.036	0.062	0.038	0.177	0.963	0.351

上の表は12パターンの大気圧条件の下で測定されたFLP、FBPのデータをまとめたものである。測定値としての電子温度、電子密度は同じ条件で得られた数値30点の平均値をとった。熱拡散電流はシース厚みを考慮せず、プローブ表面に入ってくる電子電流を計算したものである。プローブ電流値の理論値は印加電圧に応じたシースの厚みを計算し、シース表面に入ってくる電流値を計算した。

この表から、FBPプローブ電流の測定値と理論値は概ね近いが、大気圧が大きく電子密度が大きい時には差が大きくなる傾向が見てとれる。電子密度が約 3×10^5 個/cm³を下回ると測定値と理論値は近く2倍以内の範囲に入ってくる。電子密度が大きい場合に差が大きくなる原因としては、シースの厚みが近似式では良く表現できなくことに起因する可能性が考えられる。

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Langmuir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.