

観測ロケット S-520-27 号機搭載 FBP(Fixed Bias Probe)の校正試験

阿部 琢美 (宇宙航空研究開発機構)

1. はじめに

我々は観測ロケット搭載用の固定バイアスプローブ (Fixed Bias Probe) の開発を行っている。この測定器の目的はロケットの飛行中に電離圏において高サンプリングレートで飽和電子電流を測定し、微小スケールの電子密度擾乱の情報を得ることにある。電離圏中には様々な空間スケールのプラズマ擾乱が存在するが、本測定器によって得られる擾乱の特性から生成メカニズムに関する重要な示唆が得られる。平成25年度には、開発した固定バイアス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、動作確認試験および校正用データの取得した後、観測ロケットに搭載して電離圏下部における電子密度擾乱の観測に成功した。本稿ではこれらの試験および観測ロケットに搭載して実際のフライト時に取得したデータについての報告を行なう。

2. 平成25年夏に行なった観測ロケット実験の目的と概要

宇宙科学研究所は平成25年度夏期に2機のロケット (S-520-27 号機 および S-310-42 号機) を連続して打上げる実験を行った。この実験の目的は2機のロケットに搭載した測定器により電離圏E領域 (低高度) 及びF領域 (高高度) において観測を実行し、2つの領域間で生じる電氣的磁氣的な相互作用、および電離大気-中性大気間のエネルギー交換過程の全容を解明することにある。2機の観測ロケットは7月20日午後11時から約1時間弱の間隔で連続して打上げられた。

実験を通して搭載された観測機器によりプラズマ中の電子密度およびその擾乱、電界、磁界等に関するその場観測が行なわれ、併せて S-310-42 号機と S-520-27 号機のそれぞれのロケットから放出された TMA、リチウムによる発光雲を地上及び航空機から連続撮像することで中性大気風速の推定を可能にした。また、ロケットに搭載したビーコン送信機からの電波を地上で受信することによって、ロケットから地上までの全電子数観測を行なった。

3. 固定バイアスプローブ(Fixed Bias Probe)の詳細

固定バイアスプローブ (FBP) は2機の観測ロケットのうち S-520-27 号機に搭載され、電離圏E領域とF領域において電子密度擾乱の観測を行なった。本測定器はロケットの最先端部に取り付けられ、プローブとしては直径3 cmの球型電極が用いられた。一般に球型電極に流れ込む飽和電子電流は次の式によって表される。

$$I_e = 4\pi r_p^2 N_e e \left(\frac{kT_e}{2\pi m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

ここで、 r_p は球型電極の半径、 N_e 、 T_e は電子密度と電子温度、 m_e は電子質量である。

電極に対して+数Vの正電圧を印加した時には電子シースが形成され、次の式により与えられる電子電流がプローブにより収集される。

$$I_e = 4\pi r_p^2 N_e e \left(\frac{kT_e}{2\pi m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \left(1 + \frac{eV_p}{kT_e} \right) \quad (2)$$

ここで、 V_p はプローブに印加される電圧である。S-520-27号機に搭載された固定バイアスプローブでは電子電流測定用とイオン電流測定用の2種類のプローブがロケット頭胴部先端に搭載され、打ち上げ後のロケットノーズコーン開頭後にプラズマ中に露出され測定を開始した。通常、ロケットは電離圏を飛行中はプラズマに対して負に帯電するが、プローブに印加する電圧としてはこれを考慮し、帯電した場合でも常に電子電流測定プローブではプラズマに対し正、イオン電流測定プローブでは負の電圧が印加されるようにした。固定バイアスプローブの主な諸元は次の通りである。

表 1. 固定バイアスプローブの諸元

| | FBP-1 (電子測定用) | FBP-2 (イオン測定用) |
|---------------------|-------------------------------|----------------|
| 印加電圧 | + 4 V | - 3 V |
| 電流 full scale (低利得) | 20 μ A | 0.2 μ A |
| (高利得) | 1 μ A | 0.01 μ A |
| テレメータ出力 | 3200 Hz | 3200 Hz |
| 校正信号 | 60 秒間に 1 回フルスケールの 0.5 倍出力を与える | |
| プローブ寸法 | 直径 3 c m (球形) | 直径 3 c m (球形) |

4. 大型スペースチェンバーでの性能確認／校正試験

FBP の性能確認試験は平成 24 年度に一度行ったが、その後諸元を微調整したために 25 年度に試験を再度行うこととした。

大型スペースチェンバーを用いた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なった。

- 1) スペースチェンバー内に固定バイアスプローブおよびプリアンプ、そして比較用球型ラングミュアプローブを設置し、チェンバー内を高真空に排気する。
- 2) 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。
- 3) 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の電子電流測定用プローブには正の一定電圧、イオン電流測定用プローブには負の一定電圧を印加し、出力電流情報を取得する。

- 4) 球型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。これらの値から固定バイアスプローブで得られるべき電子電流値を計算する。
- 5) 4) で計算から得られた電子電流値と固定バイアスプローブによる測定で得られた電流値を比較し、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。

5. 固定バイアスプローブ電流値の計算値と測定値の比較

上に述べた方法により、ラングミュアプローブの取得データから推定した電子密度と電子温度から固定バイアスプローブへ流入する電子電流の理論値を計算する。真空チャンバー内に設置された固定バイアスプローブはグラウンドと等電位ではなく、チャンバーに対して負の電位をもっていると考えられるが、ラングミュアプローブの観測データからここでは -2 V に沈んでいると仮定して、プローブに流れ込む電流を計算した。

計算結果を比較すると、電子電流値の理論値と測定値が近いことから、固定バイアスプローブは正しい電流値を測定していることが確認された。両者の差は $10\sim 15\%$ 程度であるが、これについては、1) 固定バイアスプローブの電位はチャンバーに対して一律に -2 V 帯電しているとした仮定の妥当性、2) 式(2)は近似式であり誤差が伴うこと、に原因があるかもしれない。

6. ロケットのフライト時に取得されたデータ

観測ロケットが打上げられた際に電離圏中においてFBPが取得した電子電流とイオン電流のデータを図1に示す。左側がロケット上昇時、右側はロケット下降時のデータで、縦軸に高度、横軸には対数スケールの電流が示されている。同じ軸上に電流を表すためにイオン電流は100倍されているため、この軸は任意スケールと受け取っていただきたい。上昇時の高度 180 km 、 260 km 、 300 km 等に見られるスパイク状の変化は測定器の動作状況を定期的に確認するために設けられたCAL信号によるもので、実際の電子密度変化によるものではない。2つの電流に見られる約2秒の周期的な変化はロケットのスピンによるもので、これはFBPの球型電極がロケット先端部に取り付けられているにもかかわらず、その影響を受けていることを示している。

電子電流は電子密度に加え電子温度の関数でもあるが、一般に後者は前者に比較して変化量は小さいため、ここでは得られた電子電流の変化を電子密度の変化によるものと仮定して考える。

基本的にプラズマ密度は高度とともに増加する傾向にあるが、それ以外の増減が観測されている。上昇時の高度 100 km 付近に見られる局所的な増加はスボラディックE層によるである可能性が高いが、この時間帯には2層になって存在していた。電子密度のピークにおいてはその周囲に比べて1桁以上高い値が観測されている。

上昇時の高度 $130\sim 150\text{ km}$ においては電子電流のみが変化しイオン電流にはほとんど変化が見られない。これは電子温度が変化したことによる影響の可能性が考えられ

るが、変化量が極めて大きく原因は不明である。

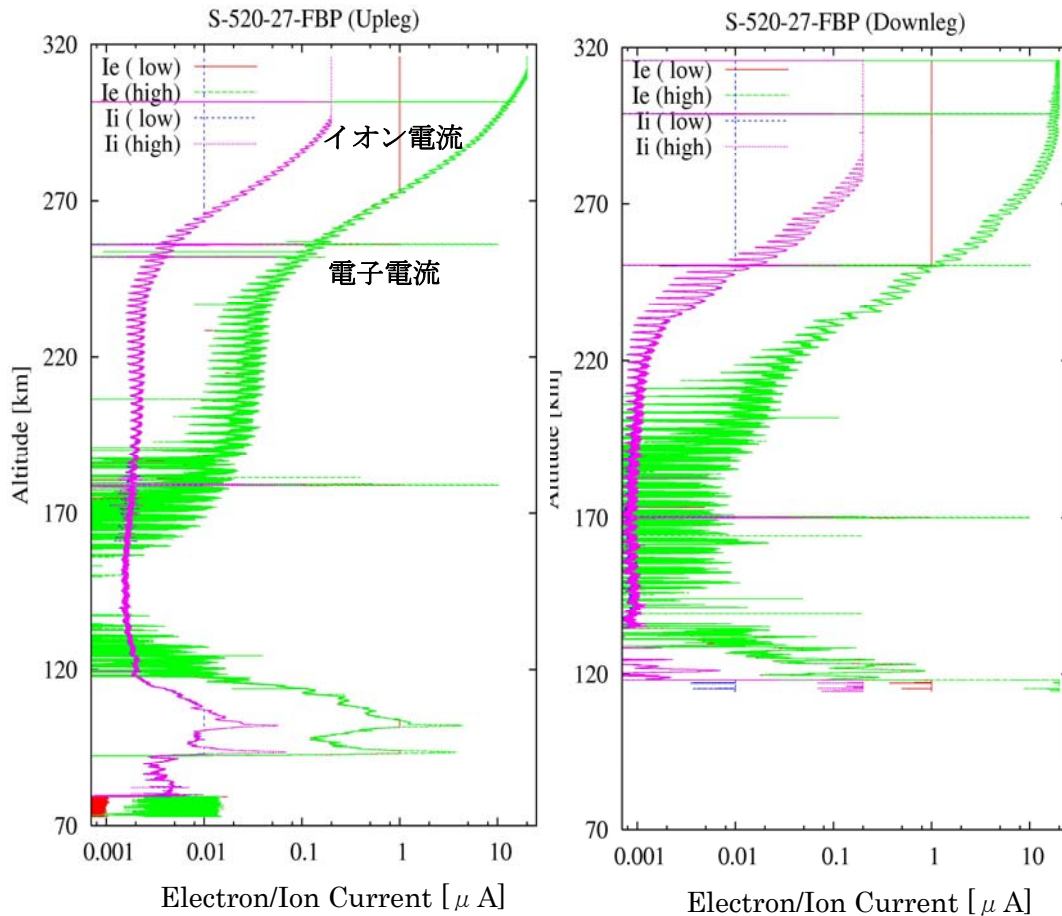


図1. ロケットの上昇時（左）と下降時（右）に観測された電子電流とイオン電流

電子電流はロケット上昇時の高度 250 km 以上で高度方向の勾配が大きくなる。これに比較して、下降時は勾配がゆるやかで、高度 220 km まで減少傾向が認められる。ロケット下降時の高度 120 km 以下では他の測定器による影響のため、正常な観測ができなかった。

今後は、電子電流およびイオン電流の詳細な解析を実施し、他の測定器による取得データと比較しながら、電離圏下部における電子密度擾乱の特徴について議論を行う予定である。

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ラングミュアプローブや固定バイアスプローブの機能確認試験を行っている。本稿では平成25年夏期に打ち上げた観測ロケット S-520-27 号機に搭載した固定バイアスプローブの動作確認試験および飛行中に得られたデータに関する報告を行った。大型スペース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。今後も飛行体に搭載する多様な測定器の試験のために本設備を使用していきたいと考えている。