

観測ロケット搭載用熱的電子観測装置の 機能確認試験と観測データについて

阿部 琢美 (宇宙科学研究所)
坂本 優美花 (東海大学大学院)

1. はじめに

我々のグループでは観測ロケット搭載用の電離圏熱的電子観測用の測定器開発を行っている。測定器には幾つかの種類があり、観測の主眼を電子温度、電子密度擾乱、電子エネルギー分布等の項目の中から絞って構成を決定する。平成27年度は観測ロケット S-310-44 号機に搭載する高速ラングミュアプローブを製作し、その機能確認試験を宇宙科学研究所の大型スペースサイエンスチェンバーを用いて行った。本稿では、その機能確認試験と観測ロケット実験についての報告を行う。

2. 観測ロケット S-310-44 号機実験

観測ロケット S-310-44 号機実験の目的は、電離圏下部 Sq 電流系中心付近に発生するプラズマ特異現象に関する数々の謎を解明することにある。ここに Sq 電流系とは太陽光入射により生じる超高層大気の潮汐と地球磁場の存在により地上からの高度 100 km 付近に発生する渦電流系のこと、大きなものは太陽直下の正午付近に北半球および南半球に各 1 個出現する。この Sq 電流系中心付近でプラズマの電子温度を観測すると局所的に数 100 K 上昇するということが過去の研究によって明らかにされた。

我々はこの現象解明のため、2007 年 1 月に観測ロケット S-310-37 号機実験を実施し Sq 電流系中心付近の電子温度上昇を観測したが、その他にも強い電子密度擾乱、電子加熱を駆動する可能性をもつ電場変動、プラズマ不安定現象存在の示唆など予想外の結果を得た。S-310-37 号機実験では予想外の現象のために観測が妨げられたこともあり、次第に明らかになりつつある Sq 電流系中心付近のプラズマの特異現象について観測機器構成を見直した上で挑もうというのが、S-310-44 号機実験である。

このロケットには 5 つの観測機器が搭載されたが、ここでは我々が担当した高速ラングミュアプローブ (FLP: Fast Langmuir Probe) についての報告を行う。

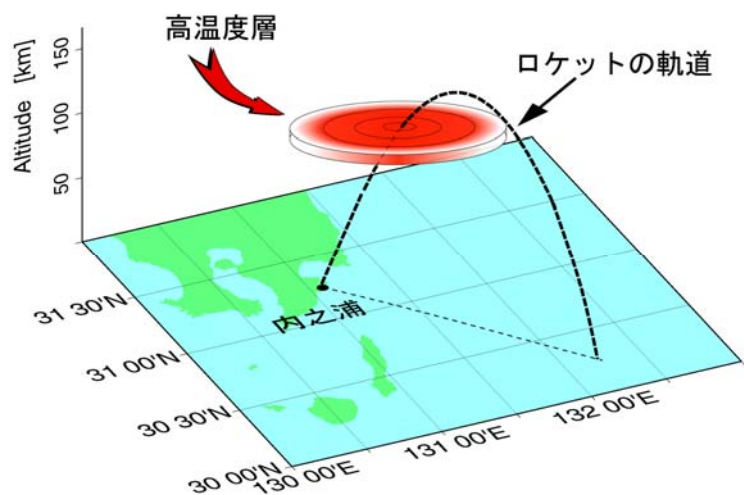


図 1. 観測ロケット S-310-44 号機実験のイメージ図。高度 100 km 付近の高電子温度層を目掛けてロケットを打ち上げ直接観測を行うことで、現象の解明を目指す

3. 観測ロケット搭載用高速ラングミュアプローブ

観測ロケット S-310-44 号機に搭載したラングミュアプローブ (FLP) は電離圏プラズマ中の熱的電子の電子エネルギー分布、電子温度・密度を測定する事を目的としている。特に今号機に搭載する FLP は、1) プローブに印加する三角波電圧に微小振幅の交流電圧を重畳し、その 2 次高調波成分を取り出すドリユベスティン法に基づき電子エネルギー分布関数を推定する、2) 球型プローブに正の固定バイアスを印加した時に入射する飽和電子電流を約 6 kHz の高速でサンプリングを行うことで微小スケールの電子密度擾乱を推定する、という 2 つの機能を有するように設計された。前者のデータを評価することで、電子温度および電子密度を算出することが可能である。電離圏中で電子密度が約 $10^4 \sim 10^6 \text{ cm}^{-3}$ の領域において測定が可能となるよう電流利得は調整された。

前述した通り S-310-44 号機実験の目的は電離圏下部 S_q 電流系中心に発生する電子加熱をはじめとするプラズマ特異現象の解明にあるが、高速ラングミュアプローブはロケット飛行中に軌道上での局所的な電子エネルギー分布、電子温度・密度の観測を行うという役割を担っている。この観測データはロケット搭載の他の観測機器により同時に取得される電離圏中の様々なパラメータとの比較を通じて、現象の解明に用いられる。

FLP では電子エネルギー分布測定用として直径 3mm、長さ約 200mm のステンレス製円筒プローブを、電子密度擾乱測定用としては直径 30mm の球型プローブを用いた。円筒プローブは予め真空チェンバー内で排気しながらランプで長時間熱することによりプローブ表面の水分や油分等による汚染を除去した後、ガラス管で真空封じしたものである。円筒プローブはこの状態でロケットに搭載されるが、ガラス管は飛行中のロケットノーズコーン開頭後にワイヤーカッターを用いて破壊され、機軸と直角方向に展開された後にスピンによる遠心力でプローブの外側に放出される仕組みになっている。こうして、プローブは汚染されていない状態で測定を開始することができる。

4. 大型サイエンスチェンバーでの機能確認試験

観測ロケット搭載用の FLP が目的に適う動作を行うことを確認するために、大型サイエンスチェンバーを用いて事前に確認試験を行った。その時のプローブ配置を示す写真が右の図 2 である。測定データの比較用にこれまでチェンバー内での測定に用いられてきた円筒型プローブを設置し、FLP と同様な電気回路部に接続した。2 つの円筒型プローブ間の距離は約 12 cm である。

後方拡散型プラズマ源を用いて大型チェンバー内にプラズマを生

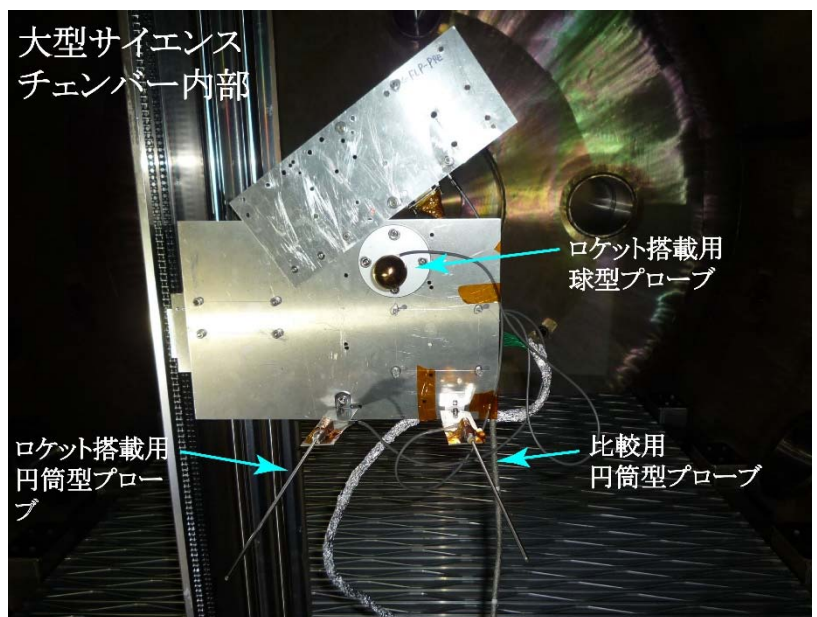


図 2. 大型サイエンスチェンバー内に設置された観測ロケット搭載用の円筒型プローブと球型プローブ。比較用の円筒型プローブも近傍にセットされた。

成し、内部のガス圧を変化させることでプラズマ密度を変化させながら観測ロケット搭載用 F L P プロブ、比較用プロブにより測定データを取得した。その結果として、搭載用の F L P は所定の動作を行い、期待通りのデータを取得することが確認された。

5. 観測ロケットのフライト時に取得されたデータ

上に述べたようにして機能が確認された後、F L P は観測ロケットに搭載され、S-310-44 号機の打上げが行われた。ロケットのフライト中の打上げから 96～100 秒に取得されたデータを示す。電子エネルギー分布観測のデータを赤、電子密度擾乱観測のデータを緑（低利得モード）と青（高利得モード）で示している。電子エネルギー分布は 1 秒間に三角波掃引が 10 回行われるため、20 組/秒のデータが得られる。この時間帯のデータはある程度の電子密度擾乱は観測されていたものの、電子エネルギー分布のほうは擾乱の少ないデータが取得されていた。

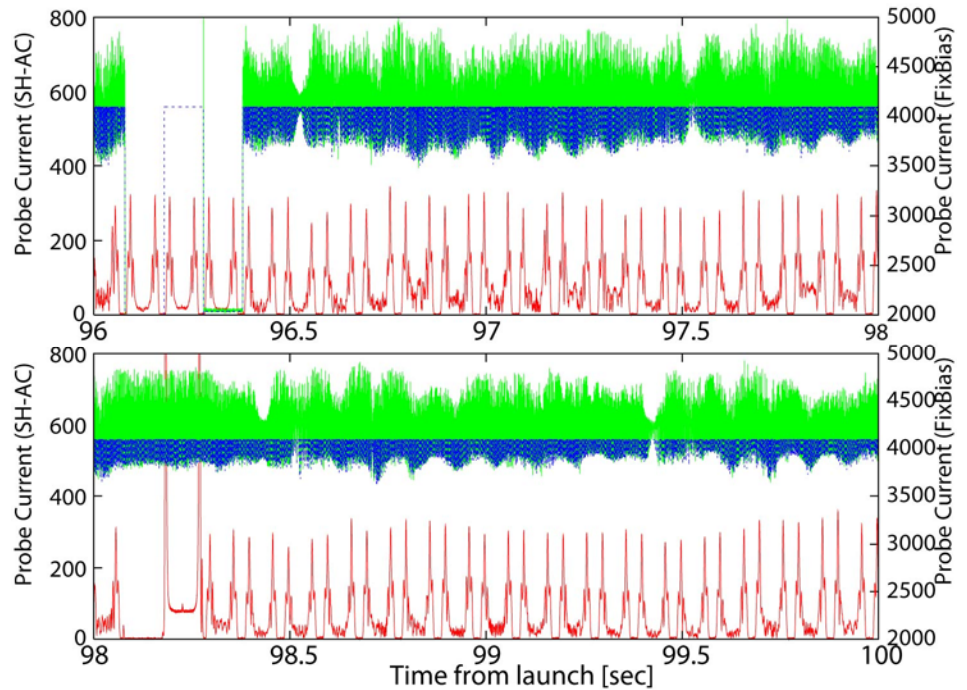


図 3. ロケット打上げ後 96～100 秒の F L P の生データ。電子エネルギー観測および電子密度擾乱観測モードのデータが示されている

電子エネルギー分布観測モードのデータをプローブの DC 電圧対プローブの 2 次高調波成分の座標系で表示したものが図 4 である。横軸はプローブに印加した DC 電圧（単位：V）、縦軸はプローブ電流の 2 次高調波成分の対数スケールでの表示となっている。図中、矢印で空間電位が示されており、ここを基準として電子のエネルギー（左側が正で単位は eV）と見ることも出来る。エネルギー分布がマクスウェル分布に従う場合、2 次高調波電流成分の電圧（エネルギー）依存は直線的になる。図において、電流ピークよりも高いエネルギー部分に 1 次式によりフィッティングを行うと電圧範囲で 1 桁半ほど直線的に変化していることから、この測定が行われた領域において電子はマクスウェル分布をしていたと解釈できる。さらに、この直線の傾きからは電子温度を導出することが

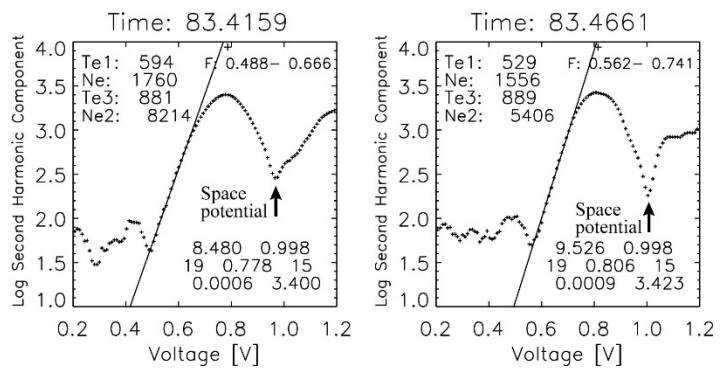


図 4. F L P 電子エネルギー分布観測のデータ

可能で、この場合約 880 K と推定された。

このような手法を用いて、個々の電流対電圧の関係から電子温度を推定し、その変化を高度に対してプロットしたものが図 5 である。高度約 100~110 km における電子温度は、前後をスムーズに結んで得られる背景温度に比べて 150~200 K 高くなっている。これは電離圏電子温度の上昇を示すもので、本観測ロケット実験でターゲットとしていた電子加熱現象を捉えたものと解釈できる。

6. まとめ

本稿では、観測ロケット S-310-44 号機搭載用ラングミュアプローブ (FLP) の製作と搭載前の機能確認試験、打上げ実験で得た観測データの初期解析結果について報告を行った。結果を簡単にまとめると次のようになる。

- 1) 電離圏の熱的電子エネルギー分布、電子温度、電子密度観測を目的として開発した観測ロケット搭載用ラングミュアプローブの機能確認試験を大型サイエンスチェンバーを用いて実施した。
- 2) このラングミュアプローブを搭載した観測ロケット S-310-44 号機は平成 28 年 1 月 15 日に打上げられ、所期の目的どおりの観測を行った。
- 3) ラングミュアプローブによる取得データは高度 100~110km において、1) 電子温度は背景に対し 150~200 K 上昇、2) 激しい電子密度擾乱が発生、していたことを示唆している。

電子加熱メカニズムに関しては、FLP 以外の観測データも加味して考えると、当初考えていた DC 的な電場により加速された電子の衝突により電離圏電子が加熱されるメカニズムに加え、LHR (Lower Hybrid Resonance) 共鳴による電子加熱の可能性を考える必要があるように考えられることから、今後はそのような方向から検討を行う予定である。

我々は今後も電離圏熱的電子観測用の測定器の開発を継続し、様々な実験に使用していく予定である。

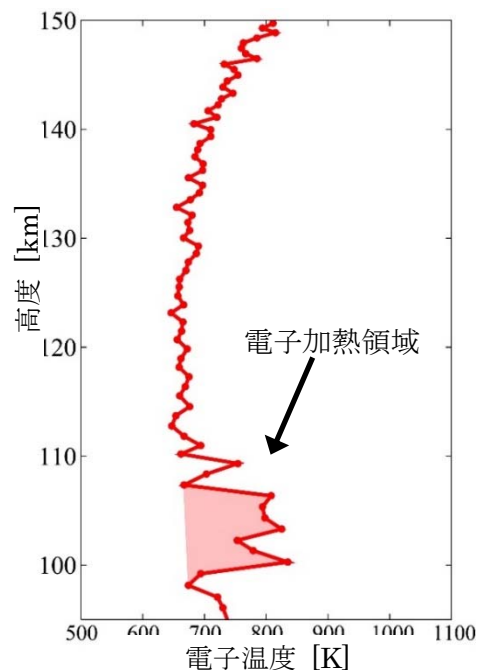


図 5. ロケット上昇時の FLP データから導き出した電子温度の高度プロファイル