

# 観測ロケット S-310-44 号機搭載ラングミュアプローブによる

## Sq 電流系中心付近における電子エネルギー分布観測

阿部 琢美 (宇宙科学研究所)

坂本 優美花 (東海大学大学院)

### 1. 概要

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 100km 付近に発生する渦電流のことで、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百 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 号機実験を実施し電子温度上昇を確認したが、その他にも強い電子密度擾乱、電子加熱の原因のひとつと予想される電場、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な現象を観測機器構成の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、本稿では高速ラングミュアプローブ (FLP: Fast Langmuir Probe) の観測データについての報告を行う。

### 2. 測定器

S-310-44 号機に搭載する FLP (Fast Langmuir Probe) 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 では、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ねし、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ことが可能な仕様とした。また、微小スケールの電子密度擾乱の観測を目的として、固定バイアスの電圧を印加するプローブも搭載する。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ている。

S-310-44 号機実験の目的は電離圏下部 Sq 電流系

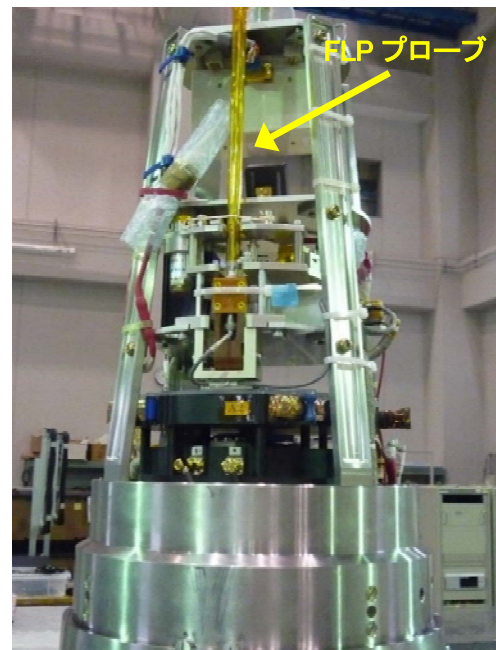


図 1. ロケット頭胴部に搭載された FLP のプローブ

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。

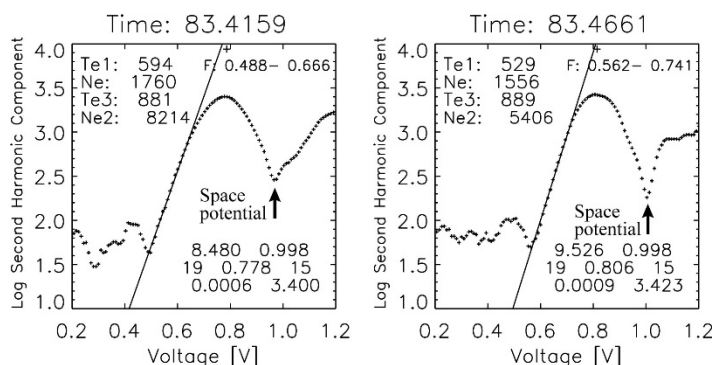


図2. FLP電子エネルギー分布観測のデータ

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る。円筒プローブは予め真空チェンバー内で排気しながら長時間熱することにより大気中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。

### 3. 電子エネルギー分布モードの観測データと電子温度の推定

FLPが取得した電子エネルギー分布観測モードの生データを図2に示す。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流範囲で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を図3に示す。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だ時に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。

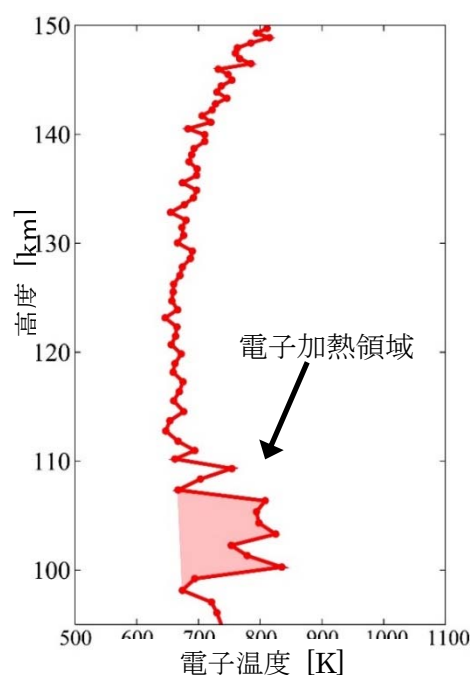


図3. ロケット上昇時の FLP データから導き出した電子温度の高度プロファイル

#### 4. 固定バイアスモードの観測データとダイナミックスペクトル

F L Pの固定バイアスモードで取得されたプローブ電流値を図4左に示す。このプローブ電流は電子密度と電子温度の関数として表されるが、電子温度の変化は相対的に小さいために近似として電子密度の変化を表していると考えてよい。電流値は高度とともに増加する傾向を示しているが、高度約98kmで局所的な上昇、124~129 kmでは高度とともに密度が減少する傾向を示している。これらは、高度方向の他にも水平方向の密度分布を反映している可能性があるため、さらに詳しく検討を進める必要がある。また、高度99~120 kmでは電流値の変動幅が大きく、これは小さな空間スケールで電子密度が変化（電子密度擾乱）していたことを示している。

このプローブ電流値の時系列データをスペクトル解析した結果を図4右に示す。但し、縦軸は高度ではなく打上げからの時間を、横軸には10~1000 Hzの周波数をとっている。ロケットは大雑把には速度1km毎秒で飛翔するため、例えば周波数100 Hzの変動は空間スケール10 mの変化を表している。ダイナミックスペクトルに見られる特徴としては打上げから81~95秒の間に数10~数100 Hzの周波数帯のパワーが増大していたことにあり、これは図4左の変動幅の増大に対応している。これらは電離圏下部の高度95~110 km付近に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。

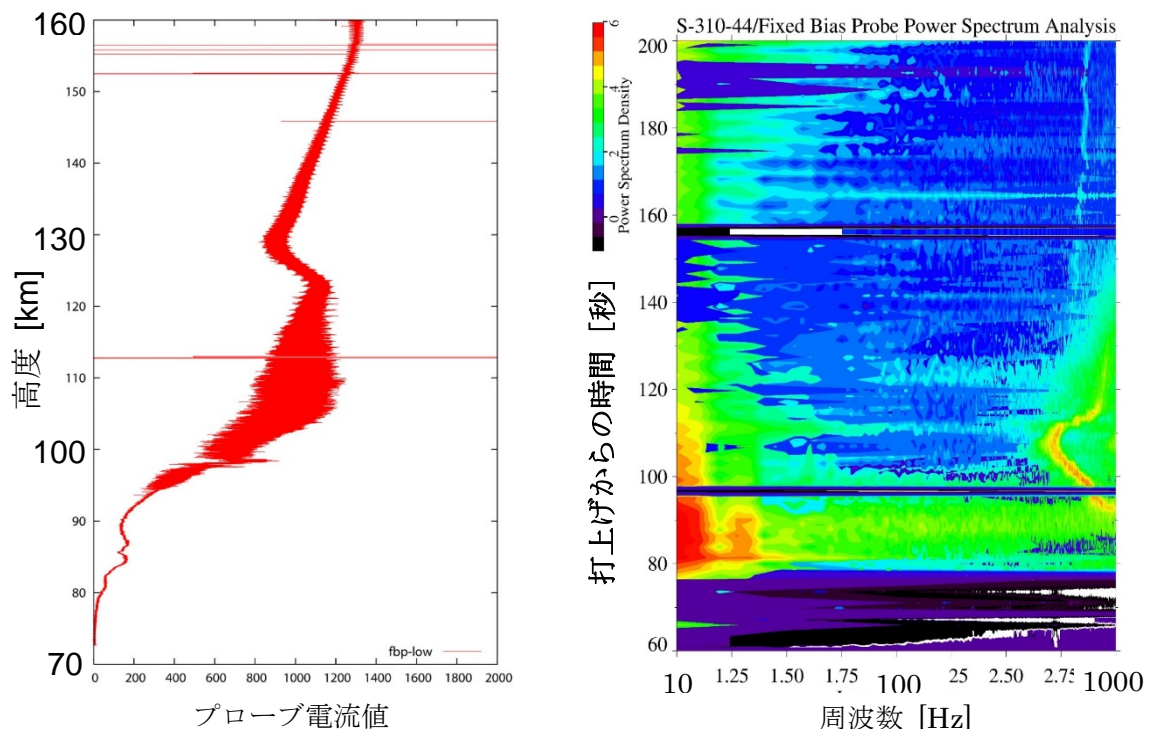


図4. 固定バイアスモードのプローブ電流（左）とそのダイナミックスペクトル

今後、取得したデータに関する詳細な解析と議論を行なうとともに、他の測定器で得られたデータとの比較を通して、電離圏下部に存在していた微小スケールのプラズマ密度擾乱の特性解明を行う予定である。

## 5. 初期解析結果のまとめ

本稿では、今年1月に行った観測ロケット S-310-44 号機実験において高速ラングミュアプローブ (FLP) によって得られたデータの初期解析結果について報告を行った。これまでの結果を簡単にまとめると次のようになる。

- 1) FLPはフライト中、予定通りの観測を実施した。
- 2) 電子エネルギー分布観測から、高度 100～110km において電子温度が背景よりも 150-200 K 上昇していたという結果が得られ、Sq 電流系中心付近の電子加熱現象を捉えたと考えられる。
- 3) 固定バイアスプローブの電子飽和電流データをスペクトル解析した結果、高度 95～110km において数 100 Hz の広い周波数帯での振幅が増大していたことから、激しい電子密度擾乱が発生していることが確認された。

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。