

# 観測ロケット S-520-29 号機搭載ラングミュアプローブによる 電離圏プラズマ観測

阿部 琢美 (宇宙航空研究開発機構)

## 1. はじめに

我々はラングミュアプローブを観測ロケットに搭載し、電離圏プラズマの観測的研究を行ってきた。この測定器は円筒プローブに三角波掃引電圧を印加し、得られる電流電圧特性から電子温度および電子密度を推定するというラングミュアプローブの標準的手法に基づいているが、観測ロケット S-520-29 号機実験の主目的はスポラディック E 層を含む電離圏 E 領域のプラズマ密度空間構造を明らかにすることであり、本測定器では高速で電圧掃引を行うことでより高時間分解能のデータを取得できるようにした。平成 26 年度には、S-520-29 号機用に開発した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、動作確認試験および校正用データを取得した後、観測ロケットに搭載して電離圏下部における熱的プラズマの観測に成功した。本稿では測定器の主な仕様および観測ロケットに搭載して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 26 年夏期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 26 年度夏期に観測ロケット S-520-29 号機を用いて電離圏プラズマの研究を行った。この実験の目的はロケットに搭載した測定器により、高度 100 km 付近に発生するスポラディック E 層を含む電離圏 E 領域の複雑なプラズマ密度空間構造をロケットに搭載した複数の測定器により観測し、その 3 次元的な構造を理解することに

ある。この観測ロケットは 8 月 17 日午後 7 時 10 分に打上げられた。この実験の特長は、1) スポラディック E 層内部に存在する金属イオンが発する紫外線領域の光の観測からプラズマ密度分布の水平構造を、2) 地上から送信される MF 帯の電波をロケット上で受信することで広範囲の電子密度分布鉛直構造を、3) ロケット上のプローブによるその場観測でロケット軌道上の電子密度分布を、各々観測し相補的にデータを用いることで電離圏下部のプラズマ密度分布の 3 次元構造を理解することにある。

実験では紫外線領域の発光観測のために用意されたロケットの姿勢制御装置が予定通り動作しなかった不具合はあったものの、各測定器の動作は正常でデータの取得に成功している。今後、取得データを組み合わせた研究を行う予定である。本稿ではロケット搭載機器のひとつであるラングミュアプローブについての報告を行う。

## 3. 高速ラングミュアプローブ (Fast Langmuir Probe) の詳細

S-520-29 号機搭載ラングミュアプローブでは電極としてステンレス製の円筒プローブ (直径 3mm×長さ約 20cm) を用いてロケットの機体から垂直に伸展した状態で測定を行った。

プローブには 3.0 V<sub>p-p</sub>、周期 125 ms の三角波を印加し、流れ込んだ電子電流、イオン電流をアンプで増幅した後テレメータ出力する仕組みになっている。こうして得られた電流・電圧特性に数的処理を施し電子温度、密度を推定する。

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、真空チェンバーにフランジを介してプローブを取り付け、ランプ照射により高温にして表面の汚染物質を除去し続けた後、真空状態でガラス封じを行った。プローブを封じたガラスは、ロケット打ち上げから 59 秒後にタイマー信号のトリガを受けカッターにより破壊され、その 1 秒後のプローブ展開によって受けるロケットスピンの遠心力により外部に放出され、その直後に測定を開始した。

FLP は電子密度の大きな変化に対応するよう高利得、低利得のゲインの異なる 2 つの電流アンプをもっている。電流のゲインは高利得が  $3\mu\text{A}$ 、低利得が  $90\mu\text{A}$  でフルスケールになるよう調整が行われた。また、電子のみならずイオン電流を含む電圧、電流特性をみるために、これらのアンプは  $+0.5\text{V}$  のオフセット電圧をもっている。測定器の較正は 30 秒に 1 回、抵抗にプローブをつなぎ替えることによって行うこととした。

FLP の製作完了後の大型スペースサイエンスチェンバーを用いて動作確認を行っ

た。チェンバー内にプラズマを生成した状態で FLP を立ち上げ、電流電圧特性を取得、得られたデータから問題なく電子温度と電子密度の導出が出来ることを確認した。

#### 4. ロケット飛行時のデータと電子温度・電子密度の算出

ロケットの飛行中に FLP の低利得・高利得チャンネルで取得した生データを図 1 に示す。プローブ電圧として周期  $125\text{ms}$ 、 $3\text{V}_{\text{p-p}}$  の三角波が印加されているために電流値は規則的に変化しているが、時間軸スケールを圧縮しているためにその変化は見えない。図 1 に見られる 1 秒以上の周期的変化はロケットのスピンまたはコーニングによって作り出されたもので、電離圏中の現象によるものではない。

電流値の最大値は電子密度に概ね比例するので上側のエンベロップがほぼ密度の変化を表していると言って良い。電子密度は打ち上げから 249 秒後のロケット頂点通過付近に最大値をもってほぼ対称的に変化しているが、これは電子密度が高度とともに増加

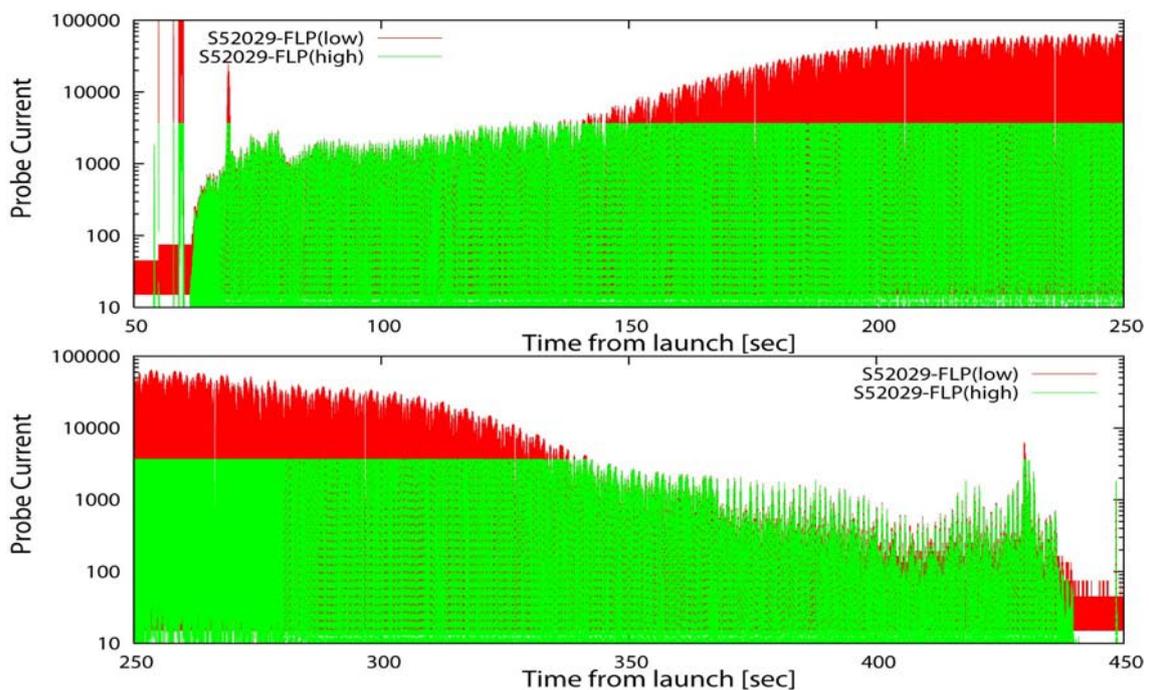


図 1. FLP プローブの電流値の変化 (時間は打ち上げからの秒数)

していた事を表している。

## 5. 観測結果

F L Pが測定した電流電圧特性に対するフィッティングにより得られた電子温度と電子密度について、ロケット上昇時の高度分布を図2に示す。ロケットのウエーク中にプローブが入ると擾乱の影響で本来の電流電圧特性が得られず電子温度が高めに、電子密度は低めに推定されるが、このため2つの値は周期的に変化している。

高度98 km付近では電子密度が約  $2 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$  から約  $8 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$  まで急激に上昇しており、これはロケットがスボラディックE層を通過したことを示している。図3にこのスボラディックE層を含む高度93~101 kmの拡大図を示す。この領域内では前後の高度に比べ電子密度が約40倍増加しているが、電子温度は周囲に比べ減少し、これはスボラディックE層内で電子温度が低下していることを意味している。減少幅は約400 Kで、ロケットウエーク内での電子温度上昇を考慮しても十分に有意な上昇幅である。

スボラディックE層より上では高度195 km付近まで電子密度が微小な勾配をもって増加しているが、高度200 km以上では勾配が倍以上に増加し高度240 kmで電子密度は  $8 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$  に達している。電子温度は180~190 km付近で極大となり、より高い高度では高度とともに減少している。

## 6. スボラディックE層内の電圧電流特性

スボラディックE層内で取得された電流電圧特性を図4に示す(細線は三角波掃引電圧の上昇時、太線は下降時)。F L Pでは0~3Vの電圧掃引に62.5ミリ秒を要するため、計125ミリ秒で電圧上昇と下降の掃引を終えることになるが、各図の上にかかれた数字は上昇掃引の開始時間を表している。

通常、電圧掃引の上昇時と下降時はほぼ同

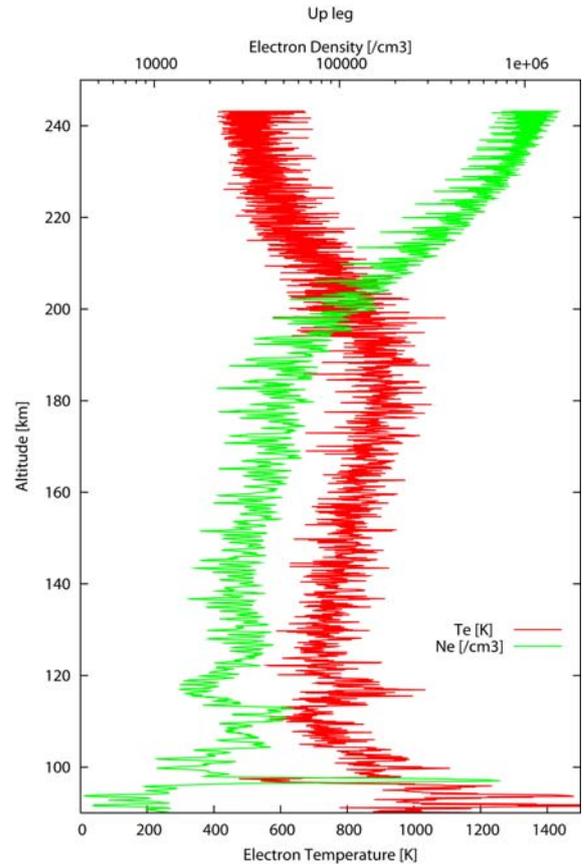


図2. ロケット上昇時の観測データから推定された電子温度と電子密度

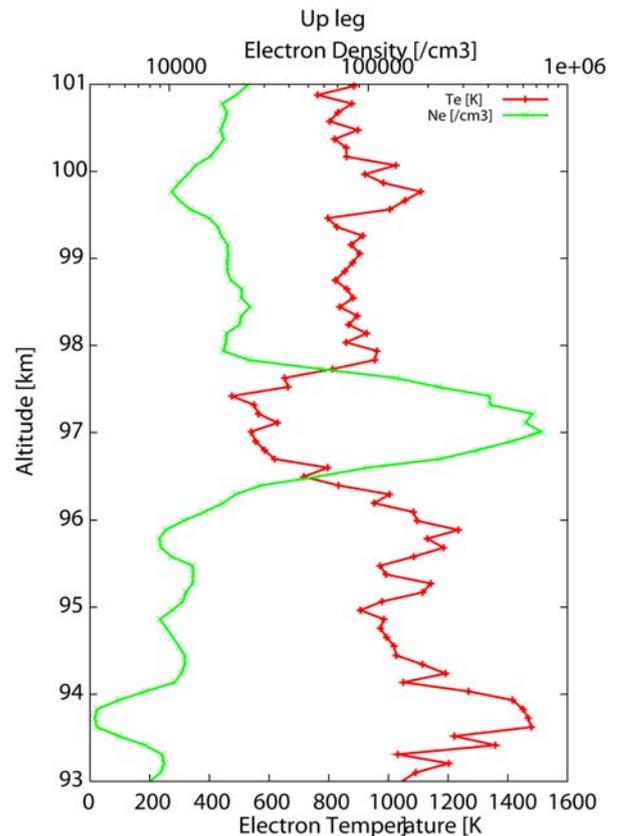


図3. スボラディックE層付近の電子温度と電子密度の変化

じ特性を示し、グラフにおける2つのカーブはほとんど重なるが、この時間帯のデータは例外で、68.085~68.336秒では電圧下降時に得られた電流が大きく、68.586~68.962秒では逆に上昇時に得られた電流が大きい。68.461秒に最大の電子密度が観測されたことを考慮すると、掃引上昇時と下降時に見られる電流値の差は三角波掃引が行なわれる125ミリ秒の間にロケットが移動した領域内で電子密度が変化していた結果であると考えるのが妥当である。これは今回観測されたスプラディックE層では背景に対する電子密度増加率が特に大きく、空間的な変化率も大きかったためである。また、この密度変化率が存在していたとすれば、電圧掃引を行なう62.5ミリ秒の間にも電子密度が変化していた可能性が高く、電子密度と電子温度の推定方法にも別な工夫を行なう必要がある。その推定法と新たな結果は現在まとめているところであり、別途報告を行う予定である。

## 7. まとめ

本稿では観測ロケット S-520-29 号機に搭載したラングミュアプローブについて、その

詳細仕様と観測目的、ロケット飛翔時に取得されたデータおよび導出された電子温度、電子密度、スプラディック E 層内で得られた特異な電流電圧特性などについて報告を行った。ロケット飛翔時の観測データに関する主な結果は次の通りである。

- 1) ラングミュアプローブはロケットフライト中に予定通りデータを取得し、電離圏中の電子温度・電子密度が算出された。
- 2) ロケット上昇時の高度 97km 付近、下降時の 100~105km 付近にスプラディック E 層が観測された。特に前者ではピーク電子密度が背景に対して約 40 倍あり、強いスプラディック E 層が存在していたことが示された。
- 3) スプラディック E 層内の電子温度は約 500 K で周囲の温度約 900 K よりも約 400 K 低い。
- 4) スプラディック E 層内では電子密度の空間変化が激しく、電圧の掃引時間内に背景密度が大きく変化していることから、新たな解析方法により電子密度と電子温度を推定する必要がある。

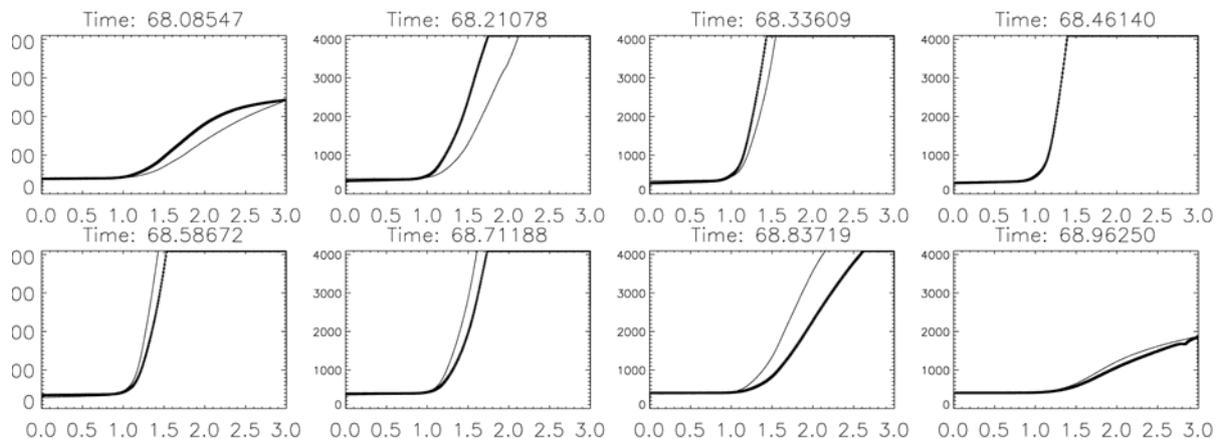


図4. スプラディックE層付近で取得された電流電圧特性。電圧掃引上昇時（細線）と掃引下降時（太線）の電流値に大きな差がみられる