

# 観測ロケットによる電離圏プラズマ加熱現象の解明

## Study on the ionospheric electron heating by sounding rocket experiment

阿部 琢美 (ISAS/JAXA), 石坂 圭吾 (富山県大工), 熊本 篤志 (東北大理),  
田中 真 (東海大), 松下 拓輝 (九州大理), 吉川 顕正 (九州大理)

### 1. 概要

電離圏下部の  $S_q$  電流系中心には電子加熱、電子密度擾乱を初めとするプラズマの特異現象が発生している。ここに  $S_q$  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、大きなものは北半球および南半球に各 1 個、太陽直下の正午付近に出現する。これに関連して、冬半球（北半球の 1～2 月）に存在する  $S_q$  電流系中心の高度 100km 付近で局所的に電子温度が数百 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  $S_q$  電流系中心付近のプラズマの特異な現象に対し観測機器構成を見直した上で挑もうとしたのが、平成 28 年 1 月に行われた観測ロケット S-310-44 号機実験である。本稿ではこの実験によって得られた観測結果についての報告を行う。

### 2. 予想された電子温度上昇のメカニズム

図 1 は実験前に予想していた  $S_q$  電流系中心付近で発生している現象の概念図である。南北半球の  $S_q$  電流系の間には電位差が存在し、2つの領域が磁力線で結ばれているため、電位差を解消する方向にプラズマが加速を受け、電子は夏半球から冬半球に向かって流れる。電子がどこまで到達できるかは電子が加速により達する速度によって決まるが、それが高度 100km 付近で、衝突によって背景の電離圏電子に対してエネルギーが与えられ、温度が上昇する。これが当初考えていた電子温度上昇のシナリオである。ポテンシャル差は電場として観測出来るはずだが、これは電気伝導率の低い低高度で顕著になるだろう。またこの状況は下部電離圏の熱的電子の領域に高速の電子が飛び込んで来る事を意味するので、プラズマ不安定現象か、それがもとで電子密度擾乱やプラズマ波動が発生しているかもしれない。このような推測をもとに、現象の発生メカニズムを解明できるように表 1 に示すような観測機器を

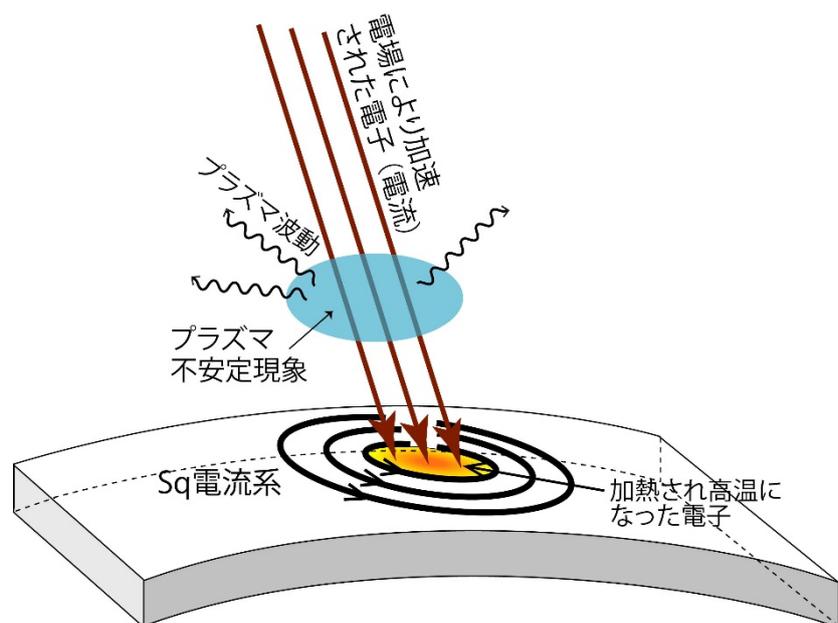


図 1.  $S_q$  電流系周辺で発生している現象

観測ロケットに搭載することに決定した。

表 1. 観測ロケットに搭載した観測機器一覧

| 観測機器名              | 測定項目  | 主担当            |
|--------------------|---|----------------|
| EFD (電場計測器)        | 電場ベクトル  | 富山県立大学         |
| PWM (プラズマ波動計測器)    | 高周波プラズマ波動   | 東北大学           |
| FLP (高速ラングミュアプローブ) | 電子エネルギー分布 (FLP-AC)<br>電子温度・電子密度 (FLP-AC)<br>電子密度擾乱 (FLP-FB) | 宇宙航空研究<br>開発機構 |
| MGF (高感度磁力計)       | 磁場ベクトル (ロケット姿勢)   | 東海大学           |
| SAS (太陽センサ)        | 太陽方向 (ロケット姿勢)   | 東海大学           |

既に述べた S-310-37 号機に搭載した観測機器からの主な改善点は次の通りである。

- 1) EFDの計測用プローブを剛性が強いものに変更し、精度の良い測定を行う
- 2) 新たに高周波 (kHz~MHz) 帯のプラズマ波動の観測を行なう
- 3) ロケットのウエークの影響を受けないよう電子密度擾乱測定用プローブをロケット先端に搭載する

EFDはダブルプローブを使用して電場計測を行なうが、前回 S-310-37 号機実験ではプローブ長が片側 1 m、また剛性が不足していたためか精確な測定が出来なかった。今回は剛性の強い長さ 2 m のプローブ (1 対の長さは約 4 m) を使用して万全を期した。Sq 電流系に向かって加速された電子が降下してくる可能性、また激しい電子密度擾乱が観測されたという過去の実験結果を考慮し、今回の実験では高周波 (kHz~MHz) 帯のプラズマ波動を観測する必要性を強く感じ、PWMが搭載された。FLPは2つの機能をもつ。直径 3mm の円筒プローブに印加する周期 0.1 秒・振幅 3V の三角波電圧に周期 2kHz の微小振幅の正弦波を重畳し、その 2 倍の高調波成分を取り出すことで、所謂プローブの V-I 特性の 2 次微分成分を推定し、エネルギー分布を導き出すのが表 2 の FLP-AC という機能である。これがマクスウェル分布と見なせる場合には電子温度や電子密度も導出することができる。FLP のもうひとつの機能は電子密度擾乱の測定にあり、この目的のために直径 30mm の球プローブをロケット先端の機軸中心に設置した。プローブには +4 V の電圧を印加し、その場の電子密度に比例する電子電流を 6.4kHz の周波数でサンプリングを行い、1 m 以下の空間スケールまでの電子密度擾乱を観測した。高高度からの降下電子は電流を担うが、過去の研究での推測によれば観測ロケットから検出できるほど、その絶対値は大きくはないと予想されていた。しかし、磁力計 (MGF) を搭載し、精密観測を通して検出できる電流が存在するか否かを実際に検証することとした。

### 3. ロケットの打ち上げ

本観測ロケット実験では Sq 電流系中心付近に存在する現象の観測を目的とするため、その位置とロケットの予測軌道との関係を見極めて打ち上げを行なう必要があった。このため、地上観測を担当する九州大学のグループが地上各点に設置された磁力計のデータをリアルタイムで解析して、Sq 電流系中心と観測ロケット S-310-44 号機軌道の位置関係を推定し、打ち上げ条件の判断を行なった。打ち上げウインドの初日である 1 月 1 2 日は地磁気活動度が活発で Sq 電流以外の電流成分が卓越し、渦電流の分布を推定することが困難だったために打ち上げを延期した。再び臨んだ 1 月 1 5 日には電流系中心とロケットの予測軌道が比較的近いと判断されたため、正午に鹿児島県内之浦

宇宙空間観測所から観測ロケット S-310-44 号機の打上げを行なった。

#### 4. 電子エネルギー分布と電子温度

ロケット打上げ後 75~105 秒に 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。下面左側の軸はプローブに印加した DC 電圧 (単位: V)、右側は打上げからの秒数、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。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直線で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

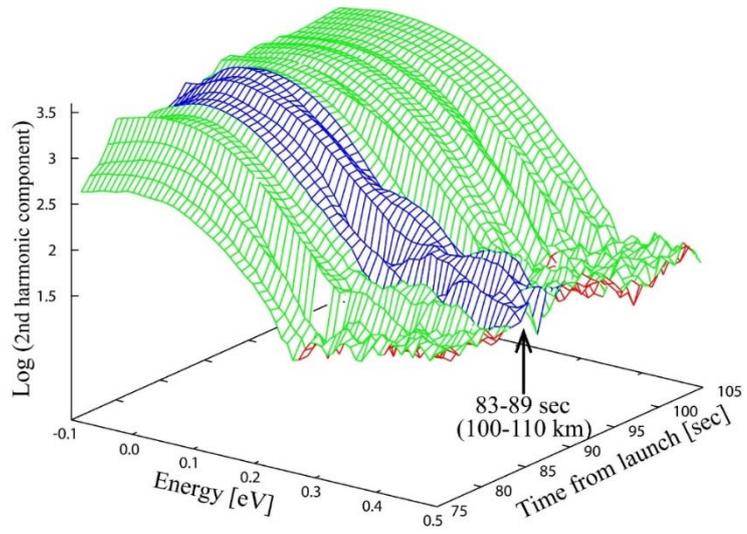


図 2. 電子エネルギー分布の観測データ

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 3 である。実線は全てのデータを示したものだが、ロケットスピンと同じ周期で変化をしている。この理由はプローブが通常正確な測定を行なうのに対し、スピンの中でロケットのウエーク領域に入ると実際よりも高い電子温度が観測されてしまうためである。したがって、ロケットスピンに応じた変化の中で低いほうが実際の値に近い。高度プロファイルでは、約 100~110 km における電子温度が、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。これは電子温度が局所的に上昇していたことを示すもので、本観測ロケット実験で狙っていた Sq 電流系中心付近の電子加熱現象を捉えたものと解釈できる。また、図 1 に示した電子エネルギー分布モードのデータにおいて、0.2 eV 以上のエネルギー帯において完全なマクスウェル分布から外れた非熱的な成分の存在が同定できる。このような分布が得られたのは電子温度が上昇した領域のみで、これは電子が加熱され温度が上昇するのと同じ領域にのみ非熱的成分が存在したことを意味している。

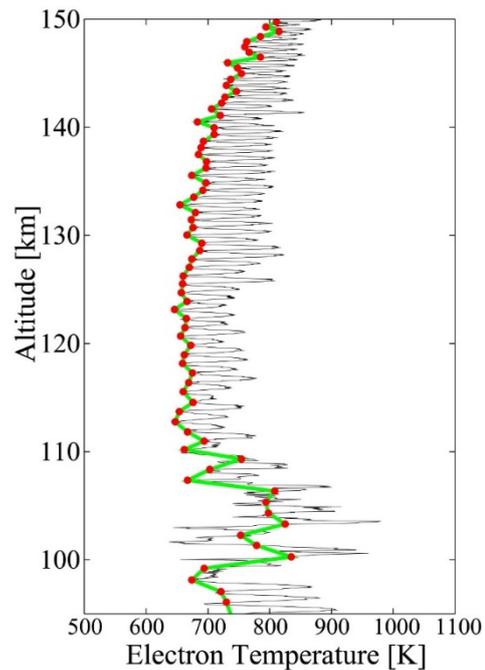


図 3. 電子温度の高度プロファイル。太い緑の線はウエークの影響を受けていない温度を結んだもの。

#### 5. 電子密度擾乱

FLP の固定バイアスモードで取得されたプローブ電流値のダイナミックスペクトルを図 4 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。横軸は周波数を表わすが、高度 100~150km ではロケット速度は約 1km/s 前後なので 100, 1000 Hz の周波数はそれぞれ約 10 m、1 m スケールの擾乱を表わすと考えればよい。

ダイナミックスペクトルに見られる特徴としては高度 95~112km で数 10~2kHz の周波数帯のパワーが増大し、激しい電子密度擾乱が発生を示唆していたことである。また、密度擾乱の領域は電子温度が上昇していた高度範囲よりも若干広く、これらの現象を作り出す原因と関係している可能性がある。

その他の特徴として、高度 100km で約 2kHz、その後高度と共に減少し 122km で 350Hz になるような周波数にピークをもつ電子密度擾乱が観測されたことがある。この起源は現在のところ明らかではないが、周波数から考えると Lower hybrid resonance の可能性があつて、これが電子の加熱に結びついている可能性が考えられる。なお、この周波数に一致する波動が PWM と EFD の観測にも現れており、今後様々な観点から、この現象の起源、および電子加熱現象との関連を議論していく必要がある。

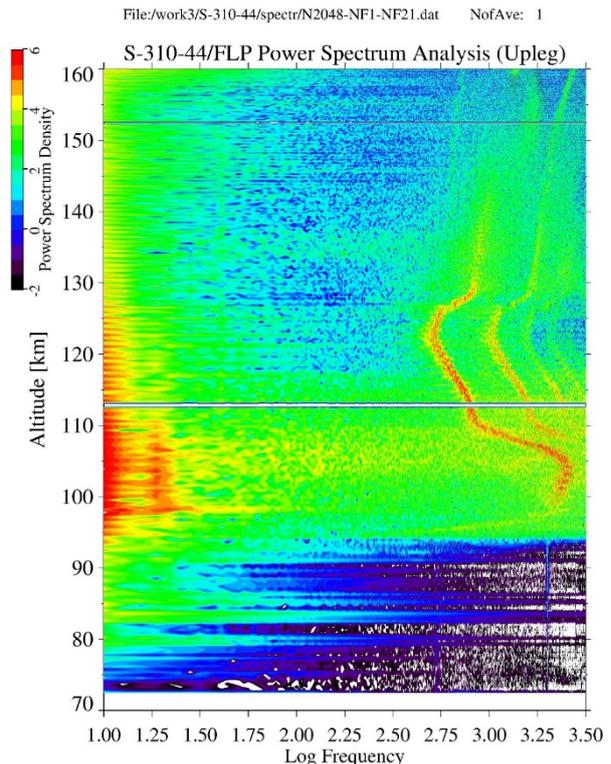


図4. FLPの固定バイアスプローブの電子電流値のダイナミックスペクトル

## 6. これまでの解析結果のまとめ

本稿では2016年1月に行った観測ロケットS-310-44号機実験に関し、高速ラングミュアプローブ(FLP)によって得られたデータを中心にこれまでの解析結果について報告を行った。Sq電流系中心付近に発生する現象についての観測結果は次のようにまとめられる。

- 1) FLPの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、この領域ではエネルギー分布に非熱的成分が存在する、という結果が得られ、Sq電流系中心付近の電子加熱現象の特徴を捉えたと考えられる。
- 2) FLPの固定バイアスプローブによる電子飽和電流値をスペクトル解析した結果、高度95~112kmにおいて数10~2kHz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。
- 3) 高度100~125kmで350~2kHzの周波数帯で変化する比較的強い電子密度擾乱とプラズマ波動が観測された。これはLower hybrid resonanceを観測した可能性が高い。

電子加熱メカニズムに関しては、今回取得されたデータを総合的に考えると、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。