

観測ロケット S-310-44 号機実験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 “S-310-44”

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. 観測ロケット S-310-44 号機実験の概要

電離圏下部の Sq 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。これらの現象の特徴を明らかにし、その発生メカニズムを解明することを主目的として、観測ロケット S-310-44 号機実験が 2016 年 1 月 15 日に鹿児島県内之浦宇宙空間観測所周辺で行なわれた。解明のためのキーとなるパラメータを観測するために、この観測ロケットには電子エネルギー分布・電子密度擾乱測定器 (FLP)、電場計測器 (EFD)、プラズマ波動測定器 (PWM)、磁場計測器 (MGF) 等計 5 個の観測機器が搭載された。本発表では、ロケットの搭載観測機器のひとつである FLP による電子エネルギー分布観測を中心に他の測定器の観測データに関する最新の観測結果について報告を行なう。

2. Sq 電流系中心の電子温度上昇とロケット搭載観測機器

図 1 は Sq 電流系中心付近に発生する電子加熱現象を説明する Oyama and Hirao [1979] によって提唱された仮説を書き直したものである。地球の昼面には南北半球に各 1 個 Sq 電流系が存在するが、両半球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の移動が生ずる。電位差は冬半球から夏半球に電流を流す方向に生じ、電子は逆向きの夏半球から冬半球への流れとなる。下向きに加速された電子が高度 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を与え、熱化の結果として電子温度が上昇する。これが当初考えられ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。またこの仮説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表 1 に示すような観測機器を観測ロケットに搭載

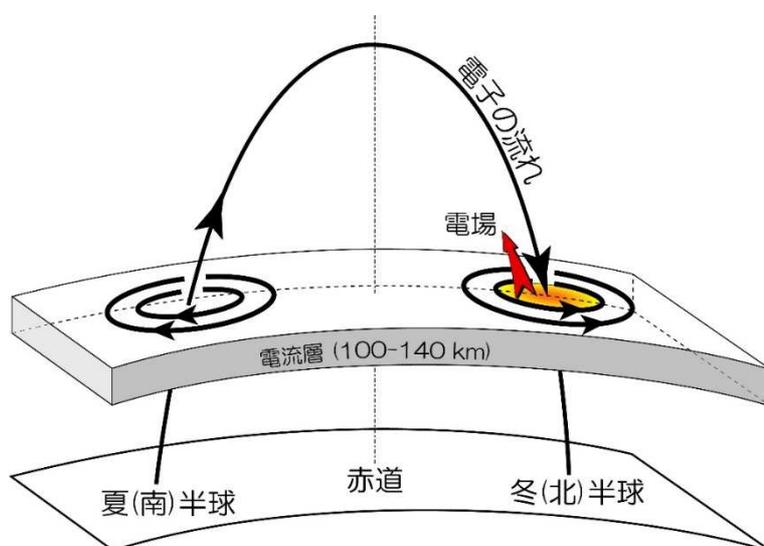


図 1. Sq 電流系中心で電子加熱を引き起こすひとつの仮説

することが決定された。

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	主担当機関
E F D (電場計測器)	電場ベクトル	富山県立大学
P W M (プラズマ波動計測器)	高周波プラズマ波動	東北大学
F L P (高速ラングミュア プローブ)	電子エネルギー分布 (FLP-AC) 電子温度・電子密度 (FLP-AC) 電子密度擾乱 (FLP-FB)	宇宙航空研究 開発機構
M G F (高感度磁力計)	磁場ベクトル (ロケット姿勢)	東海大学
S A S (太陽センサ)	太陽方向 (ロケット姿勢)	東海大学

今号機に搭載した F L P は一般のラングミュアプローブとは異なる 2 つの機能をもっている。一つ目は直径 3mm の円筒プローブに印加する周期 0.1 秒・振幅 3V の三角波直流電圧に周期 2kHz の微小振幅の正弦波交流電圧を重畳し、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を導出することができる。F L P 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。球プローブには +4V 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。

E F D はロケットから計 3 対のダブルプローブを展開して電場計測を行なう。過去に行った同様な計測で長さ約 1 m のリボン式アンテナをプローブとして用いた際には剛性が不足し精確な測定が出来なかったため、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があったため、P W M (プラズマ波動測定器) を搭載した。図 1 に示した高高度からの降下電子は電流を担うが、過去の研究における推測によれば観測ロケットから検出

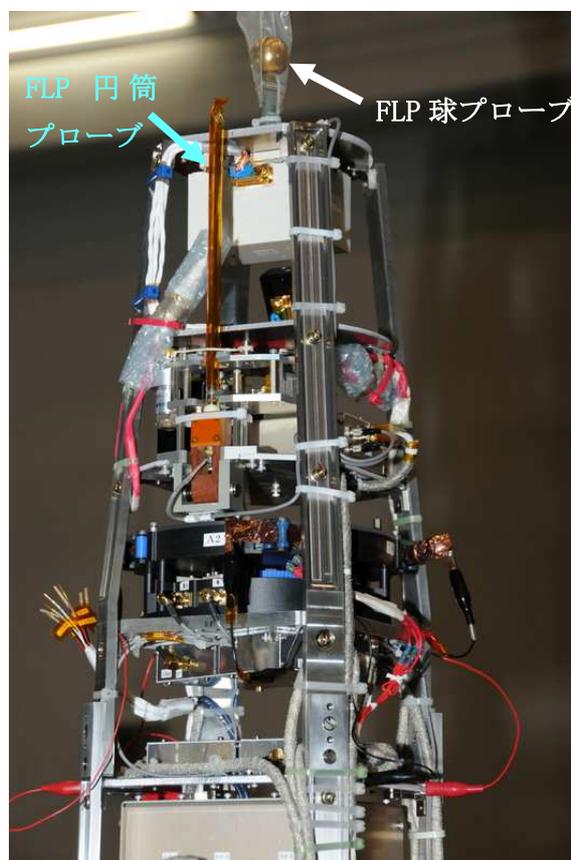


図 2. ロケット頭胴部に取り付けられた FLP のプローブ

できるだけ、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（MG F）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. ロケット打ち上げ時の Sq 電流系

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、打上げ条件の判断を行なった。図 3 に 1 月 16 日にロケット打ち上げ時の Sq 電流系の分布を示す。ロケットは水平距離にして Sq 電流系中心から 200~300km の距離を飛行したと考えられる。

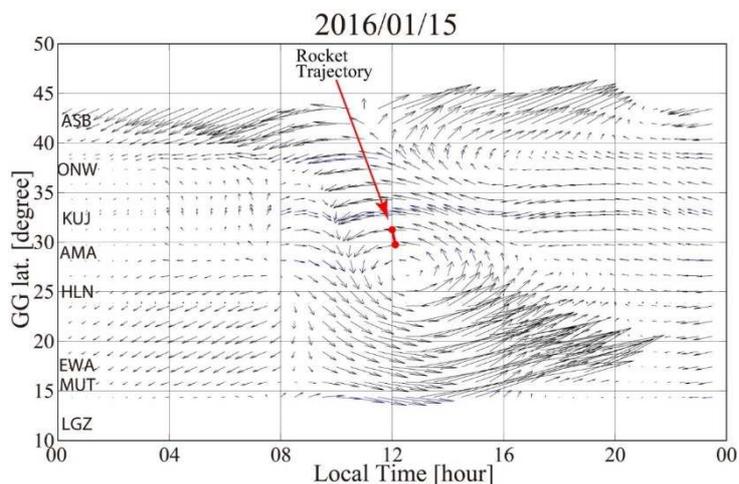


図 3. ロケット打ち上げ時の Sq 電流分布

4. 電子エネルギー分布と電子温度

F L P が観測した電子エネルギー分布から導出した電子温度の高度プロファイルを図 4 に示す。実線は全てのデータを示したものの、赤の点はロケットの飛行に伴うウエークの影響を受けていないと思われる点であり、それらを緑の線で結んだ。高度プロファイルでは、約 100~110 km における電子温度が、より高い・低い高度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 Sq 電流系中心に存在する電子温度の局所的な上昇、言い換えると電子加熱現象を捉えたものと考えられる。また、この際に得られた電子エネルギー分布のデータにおいて、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確認された。これは電子が加熱され温度が上昇していた領域に非熱的な成分が存在したことを意味している。

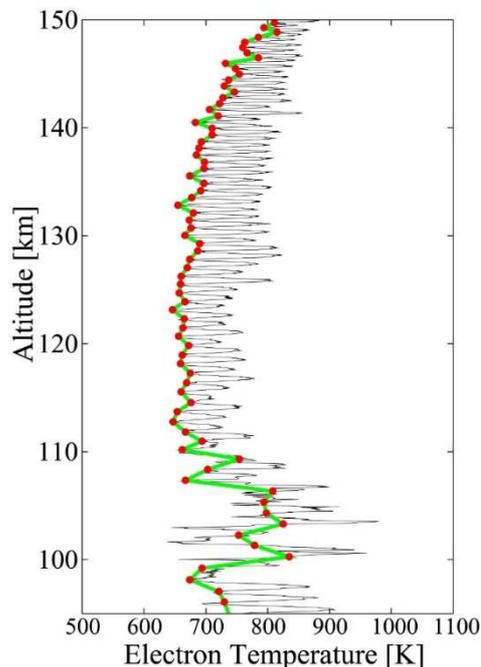


図 4. 電子温度の高度プロファイル。太い緑の線はウエークの影響を受けていない温度を結んだもの。

5. 電子密度擾乱

F L P の固定バイアスマードで取得されたプローブ電流値をスペクトル解析して得られた電子密度擾乱のパワースペクトルを図 4 に示す。プローブ電流値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。ここでは高度 90 km から 160 km までのスペクトルを約 10 km 毎に示しており、プラズマ密度が低い高度 90 km での値をバックグラウンドとして、それよりも大きなパワーを面で示した。

パワースペクトルに見られる特徴としては高度 100~110km で 10 Hz 以上、120 km 以上では 100 Hz 以上の周波数帯のパワーが増大し、激しい電子密度擾乱の発生が示唆されることである。この密度擾乱の領域は電子温度が上昇していた高度範囲と低高度側ではほぼ一致し、高高度側ではさらに高い高度にまで存在しており、温度上昇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高度 120 km で 250 Hz 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、これがイオンや電子の加熱に結びついている可能性が考えられる。

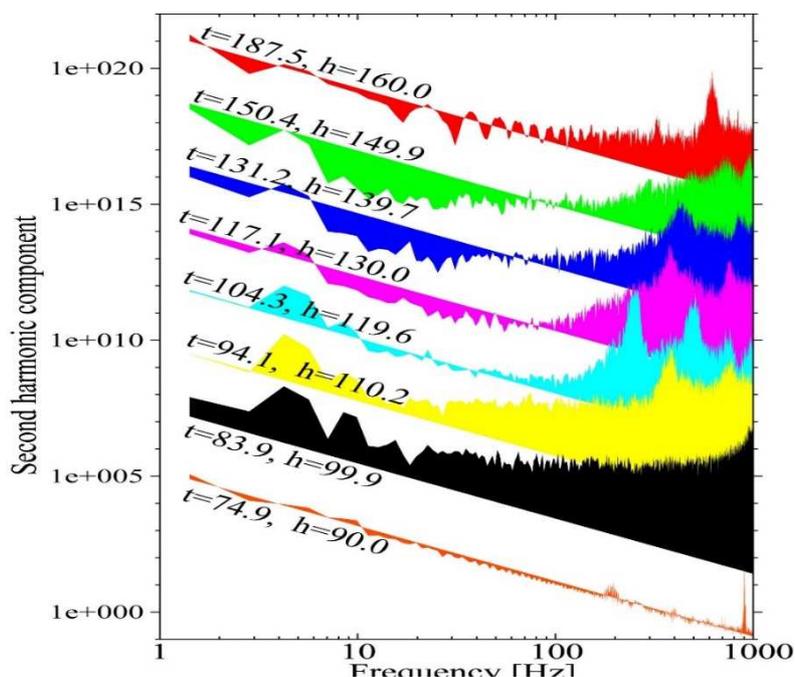


図4. 電子密度擾乱のパワースペクトラム。高度変化を比較するため、高度 90~160 km まで 10 km 毎に示している

6. 電場とプラズマ波動観測

PWM観測では 20 kHz~22 MHz のプラズマ波動を観測しているが、このデータでは高度 96~113 km において卓越したプラズマ波動が 1 kHz 前後の周波数帯に検出された。なお、この周波数は IRI モデルが提供する同高度の電子密度を用いて推定される Lower hybrid resonance (LHR) 周波数にほぼ一致することが確認されている。スペクトルに現れたピークがひとつではなく複数あり高調波周波数であることは共鳴が非線形に成長している可能性を示唆している。

EFD観測ではダブルプローブの両端の電位差を最高 6.4 kHz のサンプリングレートで測定を行っている。測定値からロケット自身の速度によって生じる $\mathbf{V} \times \mathbf{B}$ 電場を差し引いて得た電離圏中の電場データとしては、打上げから約 130 秒、230 秒付近で電場の方向が短時間に変化する他の時間帯には無い特徴があつた。また、高サンプリングレートで取得された電場データのスペクトル解析によって獲られた結果として、FLPの電子密度擾乱のスペクトル、PWM観測の高周波波動のスペクトルに見られたものと同様に、LHR 周波数に近い周波数にピークをもつ波動が検出されている。今後は、このプラズマ波動の起源、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。

7. まとめ

本稿では下部電離圏 Sq 電流系中心付近に発生する電子加熱等の異常現象の解明を目的として 2016 年 1 月に行った観測ロケット S-310-44 号機実験に関して、最新の解析結果を報告した。打上げから 1 年を経過し、データに関する議論が深まりつつある。結果は次のようにまとめられる。

- 1) 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、これらは Sq 電流系中心付近の電子加熱現象の特徴である。
- 2) 固定バイアスプローブが測定した電子電流値のスペクトル解析の結果、高度 95~112km において数 10~2kHz の広い周波数帯で振幅が増大していたことから、数 m から数 10m スケールの激しい電子密度擾乱が存在していたことが確認された。
- 3) 電子密度擾乱とプラズマ波動の観測データのダイナミックスペクトルにおいて、100~125 km の高度範囲で 1 kHz 前後の周波数に比較的強いピークが見つかった。このピークは 350~2kHz の周波数帯で変化し、IRI モデルが提供する電子密度をもとに計算された LHR 周波数に近い。

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 共鳴によるプラズマ加熱の可能性を考える必要があるように考えられる。今後はそのような方向から検討を行う予定である。

参考文献

K.I. Oyama and K. Hirao, Anomalous heating of the thermal electrons near the focus of the Sq current vortex, J. Geomag. Geoelectr., 31, 11-19, 1979.