

観測ロケット S-310-37号機搭載固定バイアスプローブによる 電子密度擾乱の観測

村上尚美 (京都大理) 阿部琢美 (JAXA/ISAS) 齋藤昭則 (京都大理) 岩満一寛 (東京理科大)

本発表では、2007年1月16日に打ち上げを行った観測ロケット S-310-37号機に搭載された電子密度擾乱測定器: 固定バイアスプローブ (FBP) の観測データについて報告を行った。

1 研究背景

冬季の昼側電離圏高度約 95-110km において、プラズマ中の電子密度が背景に対して局所的に数 100-1,000K も上昇するという特異な現象が、過去の観測ロケット実験結果から報告されている (図??)。その後の研究により、この現象発生領域が S_q 電流系中心付近に相当するということがわかってきた [Oyama et al., 1993]。

S_q 電流系は昼側電離圏ダイナモ領域 (高度 100-130km) に定常的に形成されている渦状の電流系である (図??)。理論的には、 S_q 電流系中心の電位は、冬半球の方が夏半球に比べて数 kV 高くなっていると考えられている。先行研究では、冬側 S_q 電流系中心で観測された電子温度上昇現象の生成要因として、 S_q 電流中心の半球電位差に起因する沿磁力線電場の存在が示唆されてきた (図??)。しかしそのメカニズムはまだよくわかっていない。

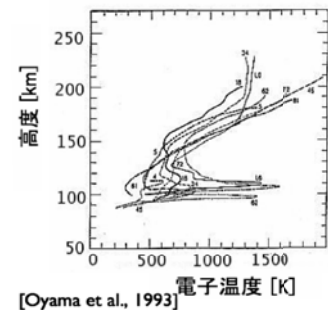


図 1: 高電子温度層の観測

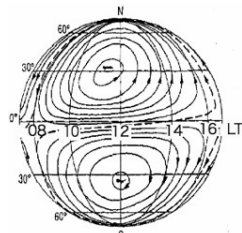


図 2: 昼側 S_q 電流系の構造

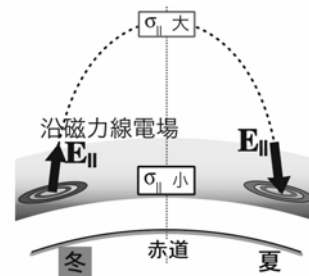


図 3: 沿磁力線電場形成のモデル図

2 観測ロケット S-310-37号機

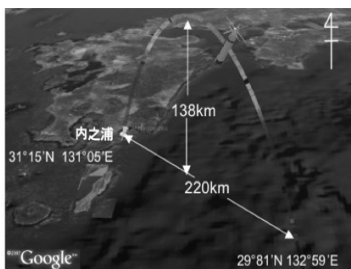


図 4: S-310-37 の軌道

観測ロケット S-310-37号機は、 S_q 電流系中心付近における電子温度上昇メカニズムの解明を目的として、2007年1月16日午前11時20分に鹿児島県内之浦宇宙空間観測所から S_q 電流系中心にめがけて打ち上げられた。搭載機器を表??に示す。

S_q 電流系中心の位置は、地上に配置された磁力計データを用いることで、準リアルタイムで追跡することができる。打ち上げは、 S_q 電流系中心が打ち上げ場所に接近していることを確認したうえで行われた。

実際の Sq 中心位置は未だ確定されていないが、おそらく観測位置よりも南に位置していたものと考えられている。ロケットは打ち上げ後約 60 秒後から観測を開始、約 184 秒後に最高到達高度 138km に到達した。図??はロケットの軌道を表している。

搭載機器である高速ラングミュアプローブ (FLP) はロケット上昇時高度 90-98 km、下降時高度 100km 以下で電子温度の上昇を観測した。また、電子温度測定器 (TEL) は、ロケット上昇時高度 96-102 km で電子温度上昇を観測した。

搭載機器	観測対象
超熱的プラズマエネルギー分析器 (SPA)	電子エネルギー分布
高速ラングミュアプローブ (FLP)	電子温度
電子温度測定器 (TEL)	電子温度
固定バイアスプローブ (FBP)	電子密度・電子密度擾乱
電場・中波帯電波測定器 (EFD)	3次元電場・中波帯電波
磁場測定器 (MGF)	磁場
太陽センサー (SAS), 地平線センサー (HOS)	太陽角, 地平線方向

表 1: S-310-37 号機搭載機器

3 固定バイアスプローブ (Fixed Biased Probe : FBP)

FBP は +5V の固定電圧を印加した直径 5cm の球状電極である (図??)。ラングミュアプローブ法の原理から、流入する電子電流は電子温度と電子密度の関数として表される。このことを用いて、流入電子電流から周囲の電子密度を観測し、さらに流入電子電流の変動量から電子密度の微小変動を数 10cm のスケールまで観測する。

FBP は、 Sq 電流系中心付近の電子密度擾乱の有無とその特性を調べることを主目的としている。この試みは今回のロケット実験が初めてである。FBP は AC チャンネル、DC high-gain チャンネル、DC low-gain チャンネルの、3 チャンネルを用いて観測を行う (表??)。

AC チャンネルのデータは電子密度の高周波の変動、すなわち電子密度擾乱の測定に用いられる。DC high/low-gain チャンネルのデータは、主に背景の電子密度の測定に用いられる。

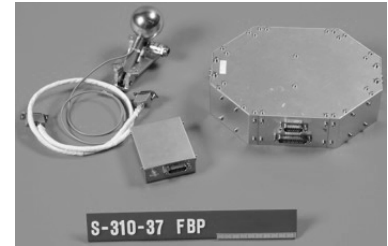


図 5: 固定バイアスプローブ

	AC	DC-H	DC-L
最大測定電流量	$\pm 1.0 \mu\text{A}$	$30 \mu\text{A}$	$1,000 \mu\text{A}$
電流分解能	$7.8 \times 10^{-3} \mu\text{A}$	$1.5 \times 10^{-1} \mu\text{A}$	$4.3 \mu\text{A}$
測定周波数範囲	200 – 800 Hz	$\leq 220 \text{ Hz}$	$\leq 220 \text{ Hz}$
電流利得	$\times 2,500$	$\times 166$	$\times 5$
サンプリング周波数	1,600Hz	400Hz	400Hz

表 2: FBP 測定チャンネル (電子電流を正で表す)

4 解析結果

本実験では、予想以上に大きな電子密度擾乱が発生していたため、ロケット上昇時の広い高度範囲で AC チャンネルの測定電流値が飽和に達してしまっている。そのため、高度 102 km までは DC high-gain チャンネルのデータから 200-220 Hz の成分のみを抽出した値も電子密度擾乱の推定に用いている。

図 6 は、ロケット上昇時における電子密度擾乱、背景電子密度、電子温度の高度プロファイルである。電

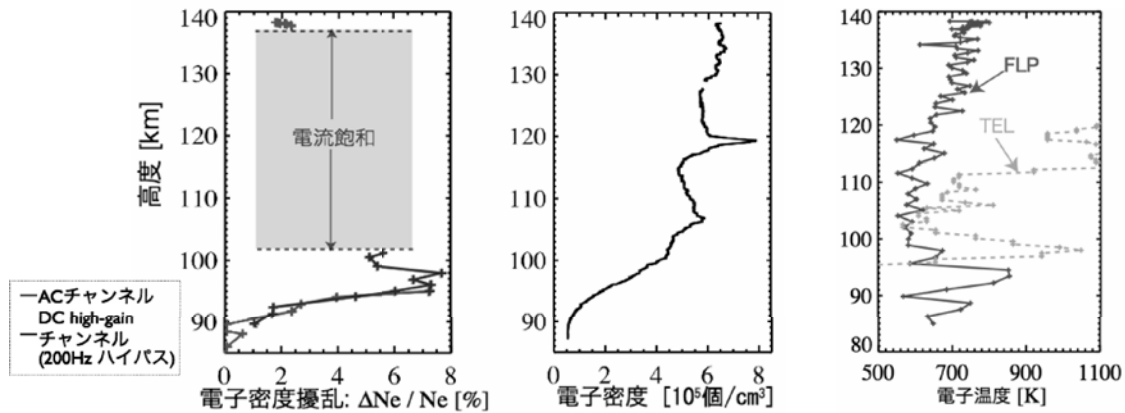


図 6: ロケット上昇時の電子密度擾乱 (左)、電子密度 (中央)、電子温度 (右) の高度プロファイル

子密度擾乱は、背景電子密度に対する電子密度変動の割合として表している。電子密度擾乱は高度 90km 付近から増大し始め、高度 93km 付近を境に急激に増大する。擾乱は高度 98km で極大をとり、この時背景に対する変動の割合は 8% に達していた。背景電子密度には、この急激な電子密度擾乱の発生に対応するような変動は見られない。電子密度擾乱は最高到達高度である 138km 付近まで継続して発生している。電子温度の上昇領域は、電子密度擾乱の発生領域と対応しているようである。

ロケット 1 スピン毎の DC high-gain チャンネルの電流値データに FFT を施し、周波数特性について調

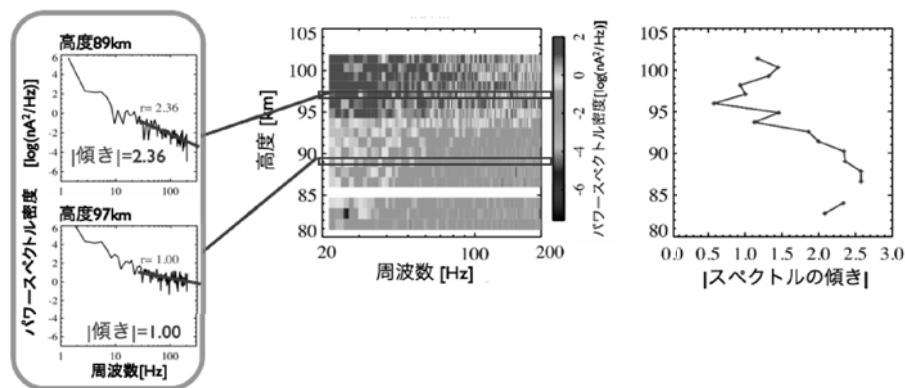


図 7: ロケット上昇時 高度 102km 以下における ダイナミックスペクトル (中央) とスペクトルの傾き (右)

べた。図 7 の中図は、20-200Hz 周波数帯におけるダイナミックスペクトルである。高度 89km・97km におけるスペクトル例 (1-200Hz) を左側に示している。さらに各高度におけるスペクトルの傾きを導出した。図 7 の右図は、スペクトルの傾きの高度プロファイルである。ダイナミックスペクトルから、高度 94km

付近を境に電子密度擾乱が急激に増大することがわかる。同時に、スペクトルの傾きが緩やかになっている。これらのことから、電子密度擾乱が強まる領域では高周波成分の寄与が増大する、ということがわかる。

ロケット下降時における電子密度擾乱、背景電子密度、電子温度の高度プロファイルを図??に示す。下

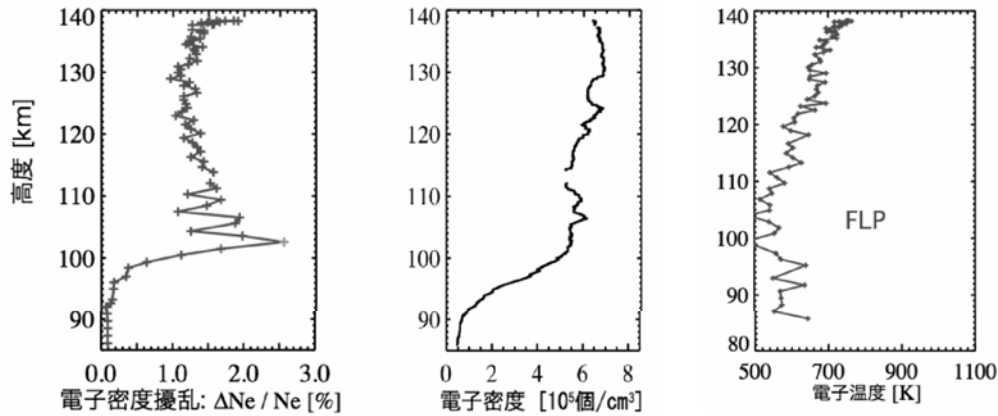


図 8: ロケット下降時の電子密度擾乱 (左)、電子密度 (中央)、電子温度 (右) の高度プロファイル

降時では、高度 100km 付近を境に急激に電子密度擾乱が大きくなる。高度 100-106km に局所的に大きな擾乱が存在しており、特に高度 103km では背景に対し 2.5%以上もの密度変動が見られる。この電子密度擾乱に対応するような背景電子密度の局所的な増大は見られない。高度 106-112km はスプラディック E 層発生高度であり、電子密度擾乱と背景電子密度プロファイルにもそれぞれスプラディック E 層に対応する増大が見られる。高度 100-106km で発生している電子密度擾乱はスプラディック E 層に伴う電子密度擾乱よりも大きい。高度 112km 以上では、電子密度擾乱は比較的小さいが、 $\Delta N_e/N_e > 1\%$ の電子密度擾乱が継続して発生している。全体的にロケット上昇時の方が、下降時に比べて電子密度擾乱が激しい。

FLP が導出した電子温度と比較してみると、電子密度擾乱が高度 100km より上空で発生しているのに対し、電子温度の上昇は高度 100km 以下で発生していたことがわかる。

5 考察とまとめ

固定バイアスプローブ (FBP) によって観測された電子密度擾乱は、上昇時高度 93km、下降時高度 100km 付近に鋭い下部境界を持ち、高高度まで存在していた。下部境界付近では特に擾乱強度が強かった。また、電子密度擾乱発生領域では高周波成分の寄与が大きくなることから、上昇時の下部境界付近のデータからわかった。これらの特徴から、先行研究で示唆されているような沿磁力線電場が高度 93-100km 付近の比較的低い高度に局所的に存在し、この電場によって加速を受けた電子がビームプラズマ不安定を介して高周波の波動を励起した、という可能性が考えられる。図??はその過程を簡単に図示したものである。

夏半球 S_q 中心付近の沿磁力線電場で加速を受けた電子は、磁力線に沿って冬半球 S_q 中心付近に降下し、広い高度範囲に渡ってビームプラズマ不安定を発生させる。これが FBP が観測した、最高到達高度 138km にまで及ぶ電子密度擾乱の原因であると推測される。一方、冬半球 S_q 中心付近の沿磁力線電場で加速を受けた電子もまたビームプラズマ不安定を発生させる。これが FBP が観測した、擾乱下部境界付近に局所的に存在する非常に強い電子密度擾乱の原因であると推測される。

プラズマ不安定性によって成長する分極電場が電子を加熱し、電子温度を上昇させるという可能性が考

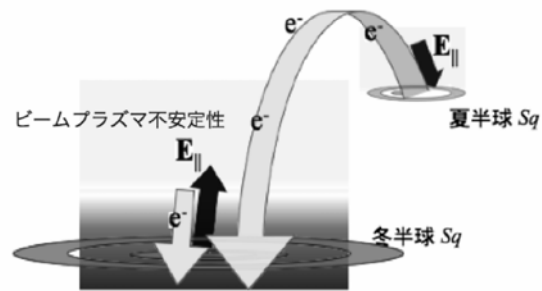


図 9: 考察スケッチ

えられるが、ロケット下降時に見られたような、電子密度擾乱下部境界よりも低高度で発生する電子温度上昇との関連性は不明である。

FBP の観測結果は、先行研究で示唆されたような沿磁力線電場の存在を支持するものであるが、実際にビームプラズマ不安定が発生しているかどうかを確認するためには、電子エネルギーの測定や波動の測定といった別の観測データが不可欠である。また、今回の実験ではデータが飽和したことによって高高度における電子密度擾乱を詳しく調べることができなかった。次の機会では、今回の実験結果を踏まえて機器性能を向上させ、より詳細な議論を試みたい。