

電離圏 Sq 電流系中心付近の高電子温度層の観測 - S-310-37 号機観測ロケット実験 -

阿部琢美、下山学 (ISAS/JAXA)

石坂圭吾、芦原佑樹 (富山県立大学)

岩満一寛 (東京理科大学)、村上尚美 (京都大学)

遠山文雄、高橋隆男 (東海大学)

湯元清文、公田浩子 (九大宙空環境研究センター)

1. 実験概要

これまで内之浦宇宙空間観測所からは数多くの観測ロケットが打ち上げられてきたが、その中で電離圏中の電子温度と電子密度は最も多く測定が行われてきたパラメータのひとつである。長期の電子温度データを解析した結果、冬期の午前 11 時頃に取得された温度プロファイルにおいて、電離圏下部の高度 100 km ~ 110 km 付近で電子温度が局所的に上昇する例が見られる事が報告された (小山ら, 1977; Oyama and Hira, 1979)。その後の解析により温度上昇はロケットが冬半球の中緯度帯に発生する Sq 電流系中心を通過した時に観測される可能性が高いことが分かった。

このように電離圏下部に発生する高電子温度層の生成メカニズムの解明を主目的として、観測ロケット S-310-37 号機が平成 19 年 1 月 16 日午前 11 時 20 分に内之浦宇宙空間観測所から打ち上げられた。電離圏プラズマの総合観測を行うように選定された観測機器は全て正常に動作し、当初の計画通りにデータを取得した。

本稿では、これまでにロケット搭載観測装置により得られた解析結果について述べる。

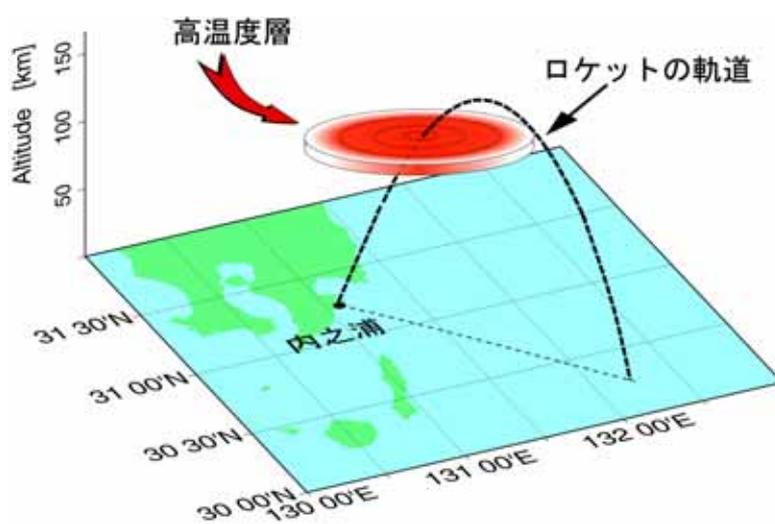


図 1 . ロケット実験のイメージ図

2. 予想していた電子加熱メカニズム

電離圏 Sq 電流系は昼側では南北半球の中緯度帯に各 1 個ずつ存在するが、夏冬の日照量の違いによりポテンシャル差 (冬半球が高、夏半球が低) が存在する。福島 (1979) はこのポテンシャル差を解消するように磁力線沿い冬半球から夏半球に向かう電流 (Inter-hemispheric field aligned current) が流れることを予言した。このポテンシャル差は電気伝導度の小さな低高度に集中するため、電離圏下部では磁力線方向にある程度の大きさの電場 (冬半球では上向き) が存

在すると考えられる。冬半球の下部電離圏に存在する熱的電子はこの電場によって下向きに加速され熱化された結果、その場の電子温度が上昇しているのかもしれない。夏半球では、電子は上向きに加速され熱化が生じ難いため、温度上昇は起こらない。この関係を模式的に表したのが図2である。

我々はこのような電子温度上昇メカニズムを想定し、キーパラメータである電子温度、電子密度、電子エネルギー分布、電場、磁場のプラズマ総合観測を行うべく測定器を搭載してロケット実験を行なった。

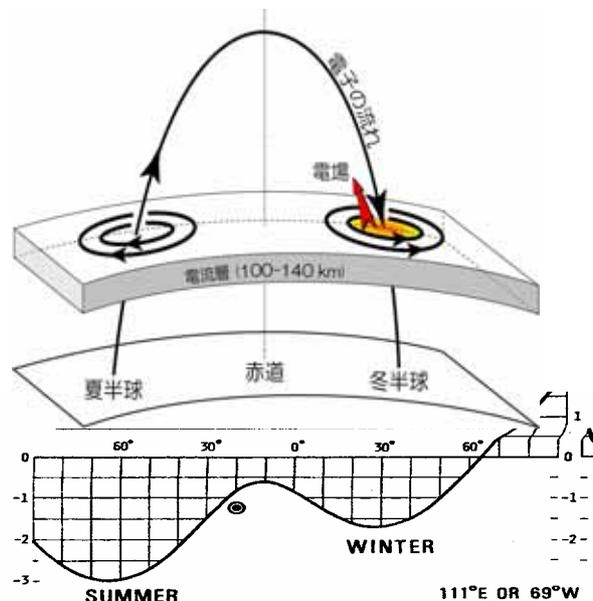


図2．南北半球を結ぶ沿磁力線電流とポテンシャル分布

3． ロケット搭載および地上観測機器

ロケットに搭載された観測機器、および地上に設置され実験期間中に観測が行われた機器の一覧を下に示す。

ロケット搭載機器

機器名称	略称	測定項目	主担当者と所属
超熱的プラズマエネルギー分析器	S P A	電子エネルギー分布 (0.1~5 eV)	下山 (ISAS/JAXA)
ラングミュアプローブ	F L P	電子温度・密度	岩満 (東京理科大学)
固定バイアスプローブ	F B P	電子密度擾乱	村上 (京都大学)
電子温度測定器	T E L	電子温度	阿部 (ISAS/JAXA)
電場・中波帯電波測定器	E F D	D C 電場 中波帯電波	岡田・石坂 (富山県立大) 他
磁場計測器	M G F	磁場	遠山・高橋 (東海大)
太陽センサー	S A S	太陽角	
地平線センサー	H O S	地平線角	阿部 (ISAS/JAXA)

地上観測

機器名称	所在地	測定項目	担当者と機関
磁力計	芦別 (北海道) 女川 (宮城県) 久住 (大分県) 奄美 (鹿児島県)	磁場 3 成分	湯元、公田他 (九大宙空環境研究センター) 情報通信研究機構

4． 観測結果

観測ロケットの打上げウインドは2007年1月16日にスタートしたが、この日にSq電流系の中心が九州地方に比較的近い南方を通過している事が予想されたため、午前11時20分に仰角79度、方位角135度 (南東方向) で打上げを行った。ロケットの飛翔は正常で、打上げから184秒後に頂点高度138kmに到達、全ての観測を予定通り行なった後に南方海上に落下した。

4.1 TELによる電子温度観測

TEL (電子温度測定器) は、プローブに高周波電圧を印加した時の浮動電位のシフト分が電子温度の関数として表されるという原理を用いたものである。プローブはロケット頭胴部の先端に設置され、最もウエークの影響を受けにくい位置にある。右の図3にロケット上昇時のTELの観測から得られた高度90~120 kmにおける電子温度プロファイルを示す。高度97~101 kmに高電子温度層の存在が確認された。温度上昇幅は背景に対し最大500~600 Kに達している。これは、所期の目的どおりにロケットがSq電流系の中心付近に存在すると思われる高電子温度層を通過したことを意味している。

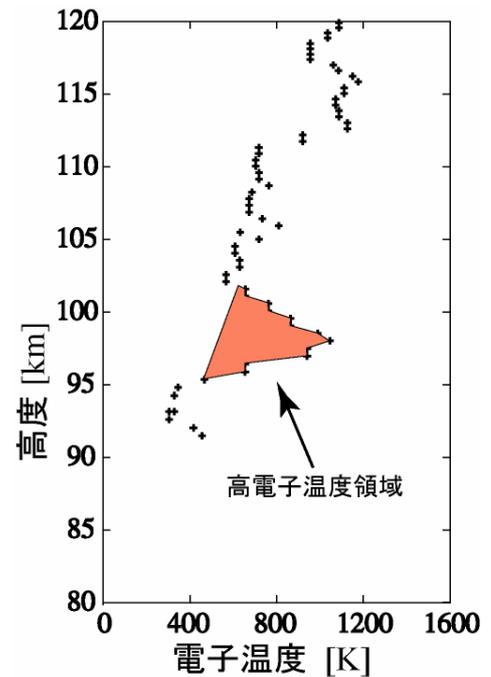


図3. 電子温度の高度プロファイル

4.2 FBPによる電子密度および密度擾乱の観測

FBP (固定バイアスプローブ) は、直径5 cmの球プローブに+5 Vの電圧を印加し電子電流を連続的にモニターすることで、微小スケールの電子密度変化を観測する測定器である。観測は電流の直流成分をモニターするDCの2チャンネル (low gainとhigh gain) と交流成分を検出するACチャンネルの3つで行われた。

DCのlow gainチャンネルで得られる電子飽和電流値にFLP観測から得た電子温度 (後述) を考慮して求めた電子密度が図4右に、DC

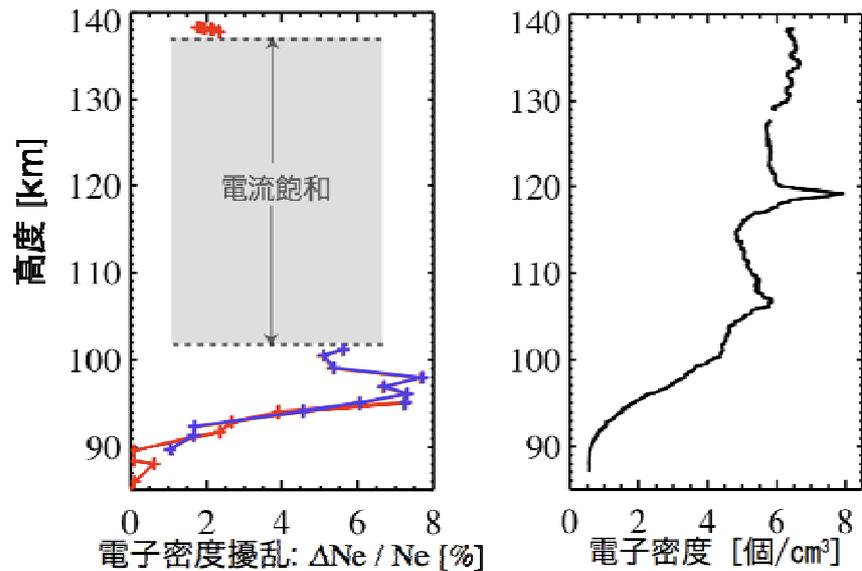


図4. 電子密度擾乱と電子密度の高度プロファイル

Cのhigh gainチャンネルとACチャンネルから得た電子密度擾乱振幅の背景電子密度に対する比を図4左に示した。

電子密度は高度90 km付近から徐々に増加し、100 kmで $4 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ に達する。電子密度擾乱は高度92 km付近から徐々に上昇し、97 kmで背景密度の約7%に達する。これは過去の観測ロケット実験 (例えばS-310-31号機) で観測された比率よりも大きい。高度102~137 kmの領域では擾乱の程度が大きく測定レンジをオーバーしてしまったため、ここでは表示していない。

次に電子密度擾乱の周波数特性を詳しく見るためにFBPの電流データのスペクトル解析が行われた。その結果は図5に示したようにパワーが高度94 kmから急激に大きくなり、102 kmまで

は周波数 20 ~ 200 Hz で一様に増大しており、特定の周波数にパワーのピークを持たないのが特徴である。また、パワースペクトルの特性を示すひとつの指標であるスペクトラルインデックス(傾き)で見ると、高度ともに傾きが徐々に小さくなるのがわかる。これは高い周波数帯でのパワーが増大し、傾きが緩やかになったことを反映している。

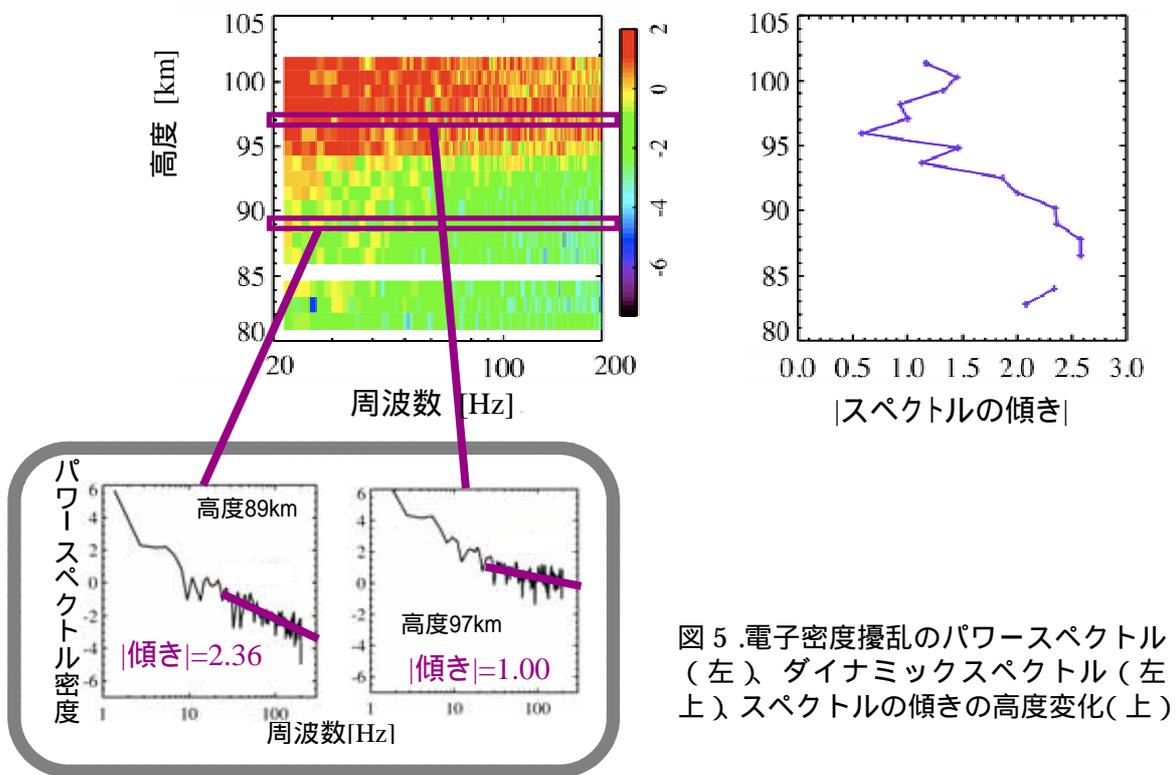


図5 .電子密度擾乱のパワースペクトル(左)、ダイナミックスペクトル(左下)、スペクトルの傾きの高度変化(上)

4 . 3 F L Pによる熱的電子エネルギー分布の観測

F L P (高速ラングミュアプローブ)は、直径 3 mm 長さ 23 cm のステンレス製円筒プローブをもち、ロケットの開頭後に機軸に対し垂直な方向に展開され観測を開始した。S-310-37 号機では振幅 4 V の三角波電圧を 2 本のプローブに印加し、1 本はプローブの電流 - 電圧特性を取得する D C モード、もう 1 本はドリベスティン法に基づきプローブ電流の二次高調波成分から電子エネルギー分布関数を推定する A C モードで観測を行なった。ここでは、A C モード観測から得られた電子エネルギー分布に見つけられた特徴について述べる。

図 6 は高度 103 ~ 130 km の 8 地点で観測されたプローブ電流の二次高調波成分振幅をエネルギーに対してプロットしたものである。0.15 ~ 0.25 eV 付近に見られるピークの右側が熱的電子のエネルギー分布を表しており、直線的に変化していればマクスウエル分布にしたがっていることを意味する。ただし、 $0.5 \times 10^{-2} \mu A$ 以下の二次高調波電流については電気回路部のノイズレベルに近いためにその意味に関して進んだ議論は出来ない。二次高調波成分振幅からエネルギー分布関数への変換は単純な数値計算で行うことが出来るが、ここではマクスウエル分布か否かの評価に有効な前者を用いて議論を行う。高度 118 ~ 130 km で観測された 4 つの分布については 0.45 eV 付近まで直線的に変化し、マクスウエル分布として観測されたことが読み取れる。これに対

して、高度 103 ~ 117 km の 4 つのデータに関しては、0.25 ~ 0.30 eV 付近にマクスウエル分布から外れた小さな「こぶ」がみられた。この非熱的成分の生成過程については、高度 100 km 付近において高いエネルギーをもつ O 原子により N₂ 分子の振動エネルギー準位が励起され、その N₂ 分子が熱的電子との衝突の際にエネルギーを与えた結果と解釈している。この際、最も確率の高い遷移の場合のエネルギー順位の差は約 0.3 eV であり、「こぶ」が見られるエネルギーに近い。

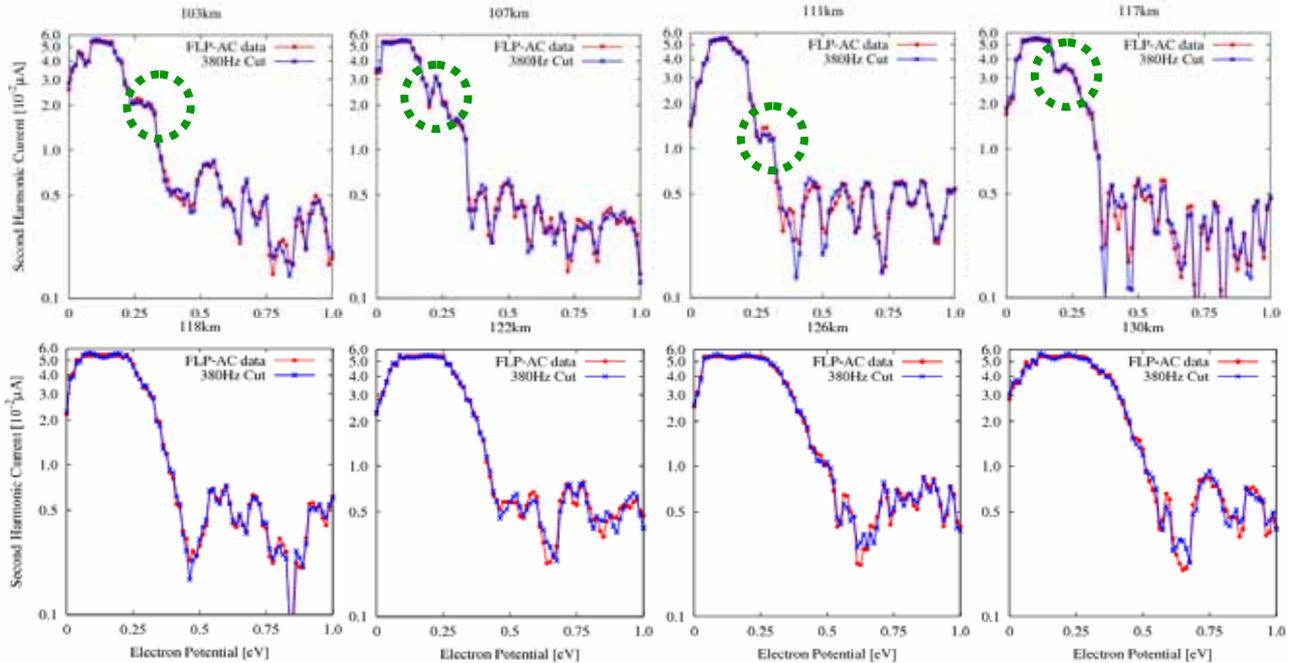


図 6 . 二次高調波成分振幅のエネルギーに対する変化

4 . 4 S P A による超熱的電子エネルギー分布の観測

S P A (超熱的電子エネルギー分布計測器) は本ロケット実験のために新規に開発された測定器で、熱的エネルギー帯から超熱的エネルギー帯までの分布の測定を可能にするもので、今回のフライトによるデータ取得で、その性能を実証することが出来た。図 7 左に S P A が高度 132, 134, 138 km 付近において観測された二次高調波成分振幅を示す(後述するようにこれらのカーブは 10 分間に得られたデータの平均値である)。F L P の場合と同様な理由でここでは縦軸に二次高調波振幅を示している。図のように熱的電子は電流値で見るとほぼ 2 桁にわたり直線的に変化している事から、S P A が熱エネルギーの数倍程度にまで良好な分布を測定可能なことがわかる。

残念ながら高度 120 km 付近までのデータは電流値の擾乱が激しく、個々の電圧スイープで得られたエネルギー分布や導出される電子温度を議論に用いることは難しい。これは 4 . 2 に述べた F B P が観測した電子密度擾乱に関連している。このような電子密度擾乱の影響を極力避けるために、10 秒毎に得られたデータを平均化し、その時間変化を示したものが図 7 右図である。打上げから 140 秒以降のデータは約 0.5 eV 以下にいわゆるコアの熱的分布が見られ電離圏熱的電子の一般的描像であるのに対して、110 ~ 120 秒(高度 113 ~ 119km) および 130 ~ 140 秒(124 ~ 129km) で平均されたデータは高いエネルギーにまで比較的大きな電流値が観測されているのが特徴である。この高いエネルギーの成分は非熱的電子の卓越を意味するのか、それとも激しい電子密度擾乱が原因なのかについては今後の解析を待たねばならない。

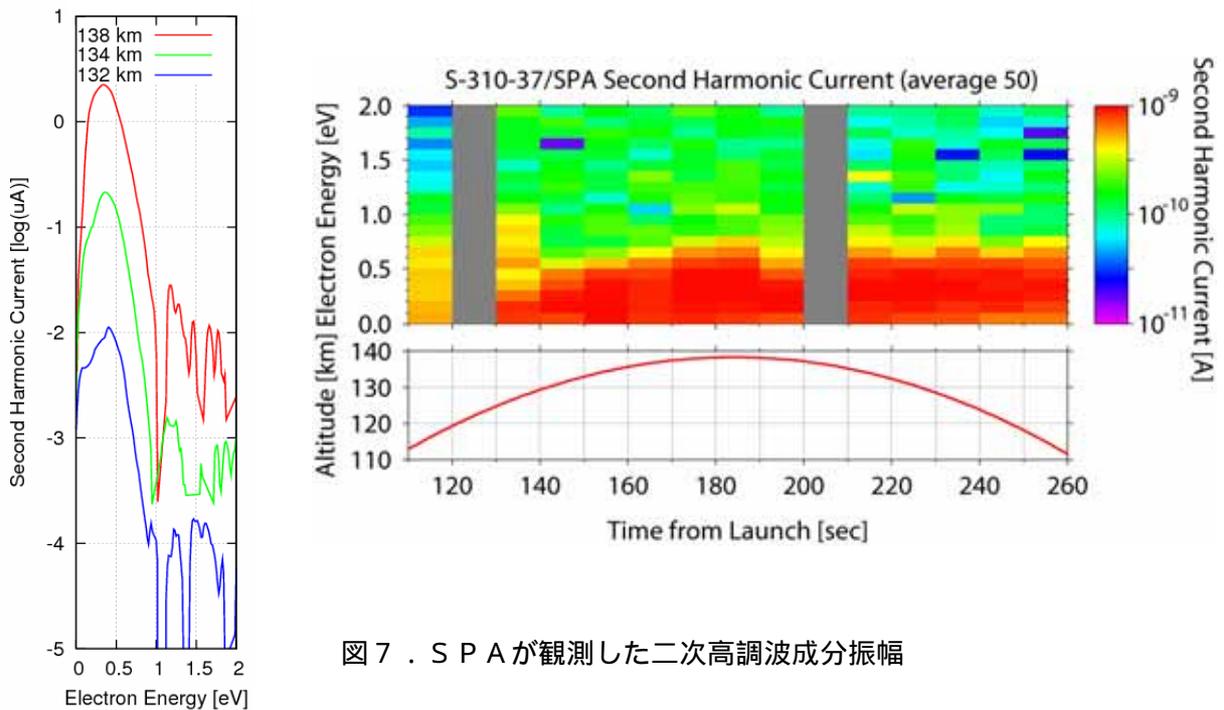


図7 . S P Aが観測した二次高調波成分振幅

4 . 5 E F Dによる電場計測

E F D (電場計測器) による観測は先端に電極を露出した計3対のダブルプローブをロケットから伸展して行われた。このうち2対はロケットの先端部に位置し、もう1対は機軸方向に約1 m離れており、これらの電位差から3次元的な電場ベクトルを計測しようとする試みであった。ロケットの姿勢情報が完全に得られていないため、取得データから電場ベクトル成分の導出は未だ途上であるが、機軸方向の成分 (E_z と呼ぶ、沿磁力線方向に近い) が高度 88 ~ 119 km において増大している可能性が高いことが報告されている。

5 . まとめ

S - 3 1 0 - 3 8号機観測ロケット実験において、ロケットの上昇時に各測定器によって得られたデータの特徴を高度に対して整理すると図8のようになる。T E Lは高度 97 ~ 101 km において電子温度上昇を観測し、F L Pはこれより低めの高度 94 km 付近を中心に電子温度上昇を観測している。両者が多少異なる高度で温度変化を捉えたことに関しては、2つの測定器が異なるエネルギーにおいて温度を算出していることに起因すると考えている。電子温度上昇は、Sq電流系中心付近でこれまでも観測されてきた熱的電子の加熱を捉えたものと考えられる。

F B Pは電子温度上昇が観測された高度 92 km 付近から電子密度擾乱を観測し、96 ~ 98 km 付近で極大となった。高度 102 km 以上では high gain チャンネルの測定レンジオーバーのため正確な振幅は推定できないが、電子温度の極大が観測された 98 km 付近で N_e / N_e の値も極大をもっていたと推測される。このような強い電子密度擾乱は、2の「予測される電子加熱メカニズム」で述べた沿磁力線電場により加速された電子ビームがエネルギー源となってプラズマ不安定現象が生じた結果、発生したのかもしれない。

