

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り観測された スポラディックE層の微細構造

坂本優美花[1], 阿部琢美[2], 三宅亙[1]

東海大学工学部航空宇宙学科航空宇宙学専攻[1]

宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所[2]

背景・目的

- 観測ロケットS-520-29号機に搭載されるラングミュアプローブは過去に打ち上げられた同じタイプの測定器に比べ、電圧の掃引周期が短く高速のサンプリングが可能になっている。このため、時間分解能に優れ、電子温度や電子密度に関する詳細な空間構造を議論するのに適したデータの取得が可能である。
- このような高時間分解能データは、過去に行われたEs層の観測に比べて、より小さな空間スケールの電子温度と電子密度に関する議論を可能にする。本研究では、このデータを用いてEs層の微細空間構造に関する議論を行う。

S-520-29号機実験概要

- 観測ロケットS-520-29号機実験の目的は、高度100km付近の電離圏下部に発生するスプラディックE層を、紫外線及び電波による遠隔観測、プローブによる直接観測の3つの異なる手法に基づいて立体的に観測することにある。
- 平成26年8月17日19時10分00秒(JST)に宇宙航空開発機構内之浦宇宙空間観測所より打ち上げられた。

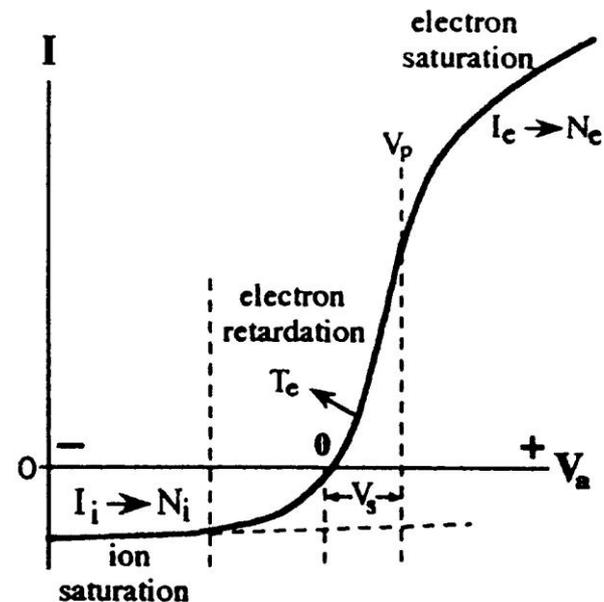
S-520-29号機搭載観測機器

搭載機器名	測定項目	担当機関
MII(マグネシウムイオンイメージャ)	マグネシウムイオン密度分布	東京大学 北海道大学
LMR(長波・中波帯電波受信機)	電子密度分布	富山県立大学
NEI(インピーダンスプローブ)	電子密度	東北大学
FLP(高速ラングミュアプローブ)	電子温度・電子密度	宇宙航空研究開発機構
DFG(デジタルフラックスゲート磁力計)	磁場(ロケット姿勢)	宇宙航空研究開発機構
SAS(太陽センサー)	太陽方向(ロケット姿勢)	東海大学

高速ラングミュアプローブ(FLP)概要

- FLP(Fast Langmuir Probe)は、電離圏プラズマの基本的なパラメータである電子温度・電子密度を観測することを目的として開発された。
- S-520-29号機において、ロケット飛翔中に軌道上の局所的な電子温度・密度の観測を行うという役割を担っている。
- 本測定器ではラングミュアプローブ法の原理に基づいて、電離圏プラズマ中でプローブの電圧-電流特性を得て、電子温度・密度を推定する。

電圧-電流特性



ラングミュアプローブの仕様

プローブに流れ込む電子電流・イオン電流は電流アンプで増幅された後計測され、テレメータへ送られる。この際、HighとLowの2つの利得をもつアンプを使用した。

FLP設計諸元

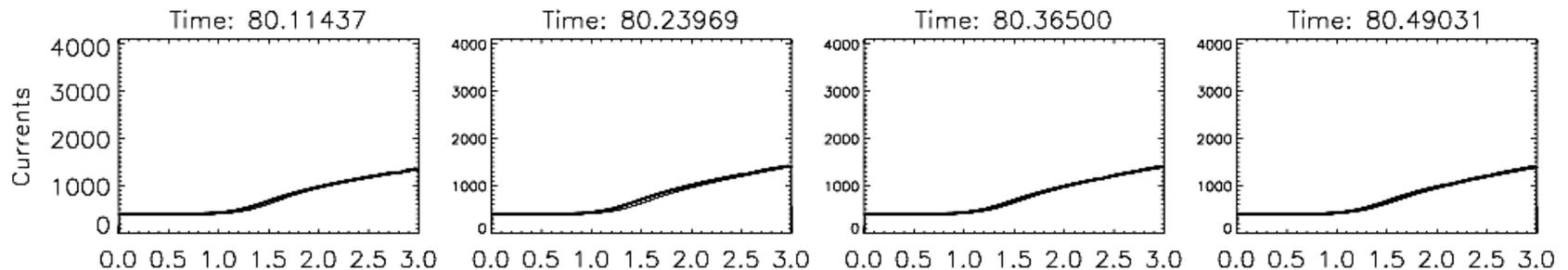
スイープ電圧	三角波, 3.0 V _{p-p}
スイープ周期	125 msec (上り, 下り)
重量	1.03 kg (FLP-S, 但し展開機構含む) 0.85 kg (FLP-E) 0.18 kg (FLP-PRE)
寸法	140 × 110 × 315H mm (FLP-S) 170 × 140 × 55H mm (FLP-E) 75 × 87 × 30H mm (FLP-PRE)
消費出力	110mA(+28V)
テレメータ出力	FLP-L 4A(W007, W023, W039, W055) FLP-H 4A(W015, W031, W047, W063)

測定用プローブとサンプリング

- 電圧電流特性を取得するために、直径3 mm のステンレス製円筒プローブを用いる。搭載する前にプローブを高温に熱し大気中の水分や油分等による汚染を除去した後、ガラス管で真空封じをする。
- この状態でロケットに搭載され、飛行中のロケットノーズコーン開頭後にガラス管が割られ、機軸と直角方向に展開された後、スピンによる遠心力でガラス管は放出され、プローブがプラズマ中で測定を開始する。
- 本実験では円筒プローブに振幅 3 V , 周期 125 ms の三角波電圧を印加し、1秒間に16セットの電圧電流特性を取得する高速サンプリングを行った。

プローブの電圧-電流特性

観測されたデータを元に解析を行い，取得されたプローブの電圧-電流特性の例を示す．



電圧-電流特性の例

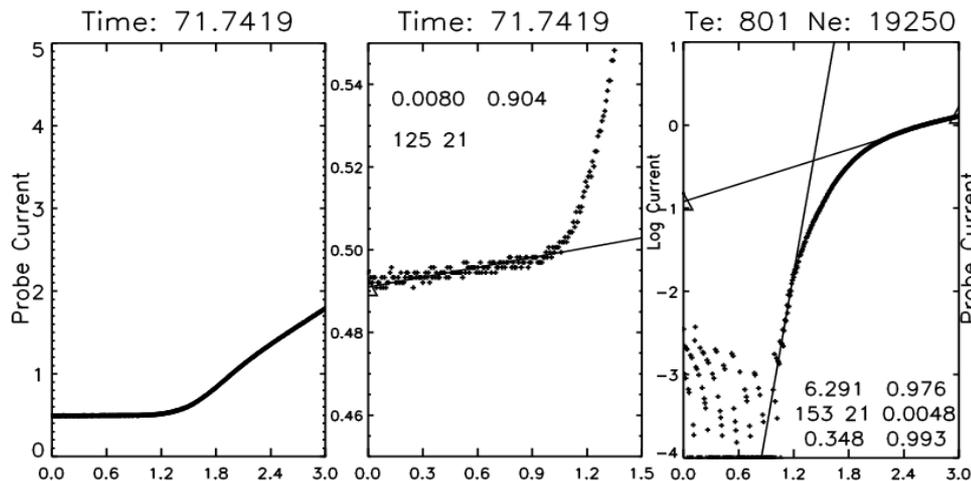
横軸はプローブへの印加電圧，縦軸はプローブ電流値．

スイープ電圧上昇時は細線，下降時は太線で表示しているが両者はほぼ重なっている．

フィッティングの方法

1. 電圧-電流特性において、イオン電流を直線で近似しプローブ電流から差し引く.
2. 差し引いた後のプローブ電流(電子電流)を対数プロットし電子電流の立ち上がり部分を直線でフィッティングする.
3. 得られた直線の傾きから電子温度を算出する.
4. 飽和電子電流値を直線でフィッティングし, 2で得られた直線との交点の座標からプラズマ空間電位と熱拡散電流を求める.
5. 求めた熱拡散電流から電子密度を導く.

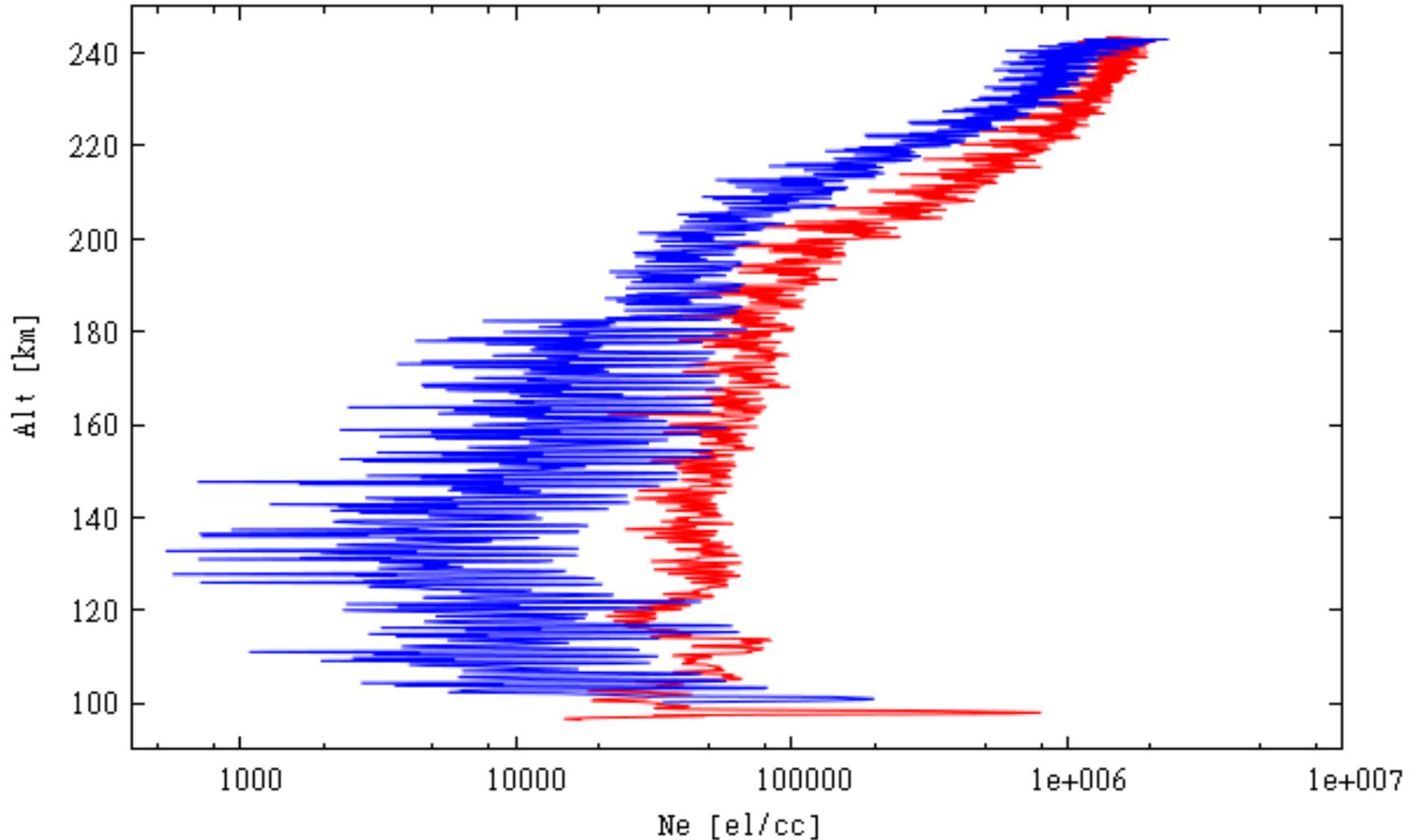
この手法より求めた, イオン電流, 電子電流, 電子飽和電流への直線フィッティングの例を下図に示す.



フィッティングの例

- (左) 電圧-電流特性
- (中央) イオン電流の直線フィッティング
- (右) 電子電流, 電子飽和電流の直線フィッティング

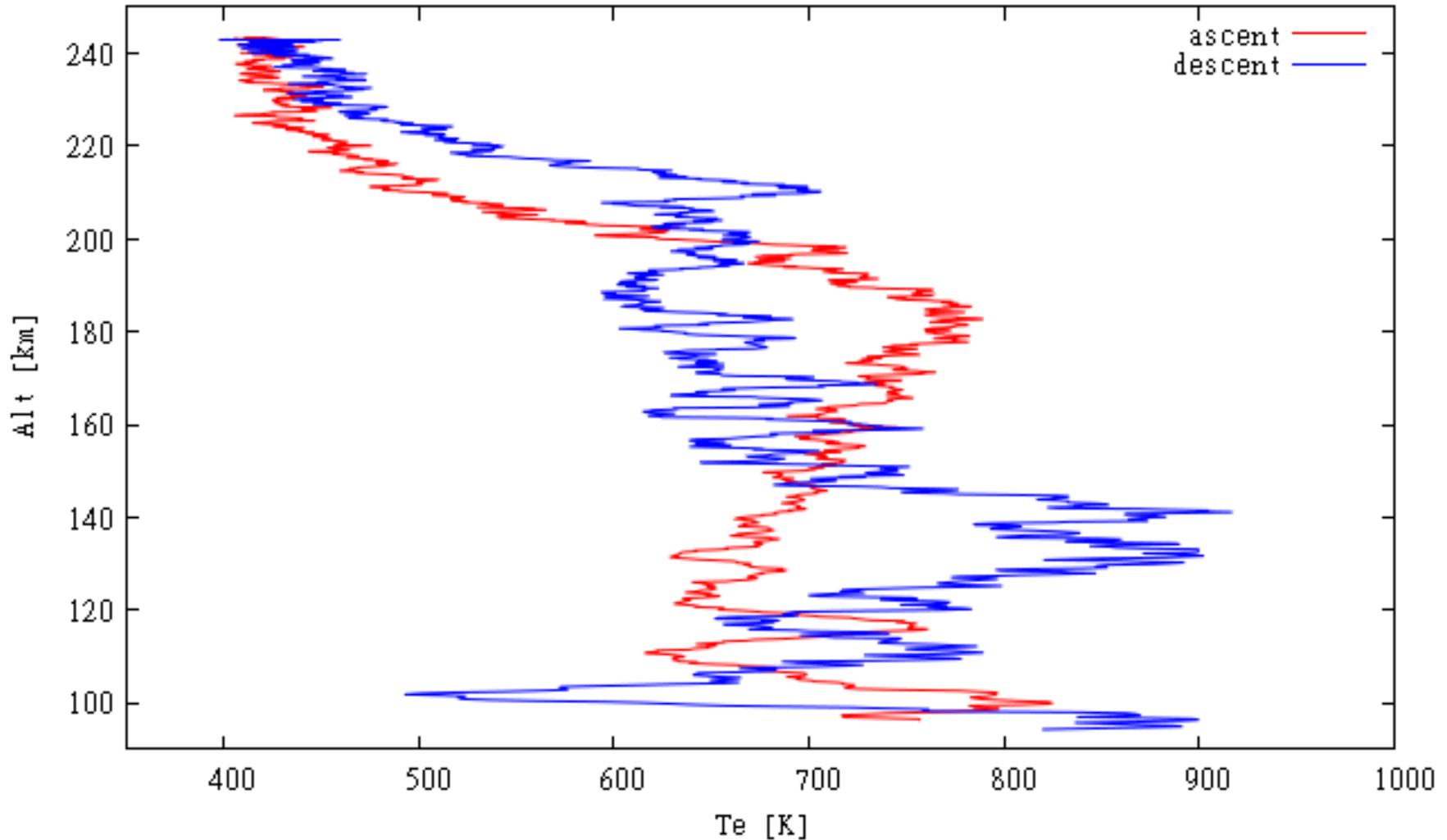
電子密度の高度プロファイル



ロケット上昇時(赤線)では98km付近に, 下降時(青線)では100km付近にEs層が見られる. 横軸は対数スケールである.

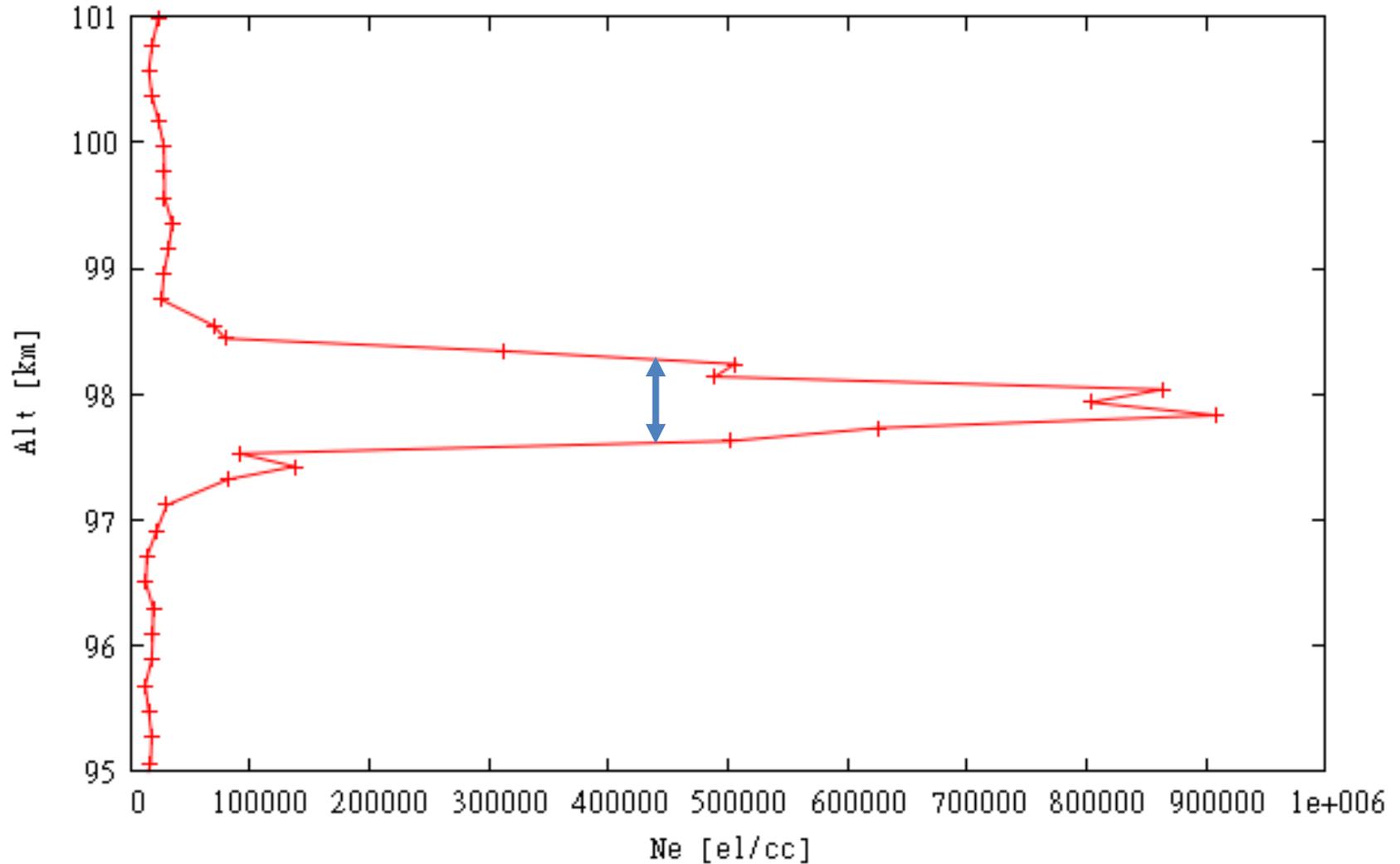
ロケット上昇時と下降時に見られる周期的な変化はロケットのスピンのによるもので, ロケットのウェイクの影響を受けているためである.

電子温度の高度プロファイル



電子密度の場合と同様に、高度100 km付近に大きな変化が存在する。電子温度については16点の移動平均をとったデータを示した。

ロケット上昇時Es層の厚さ



半値幅を用いて計算すると, 本実験で観測できた上昇時のEs層の厚さは0.69kmであった.

過去のEs層との比較

過去のロケット実験より得られたデータを元に、半値幅を用いて計算したEs層を以下に示す.

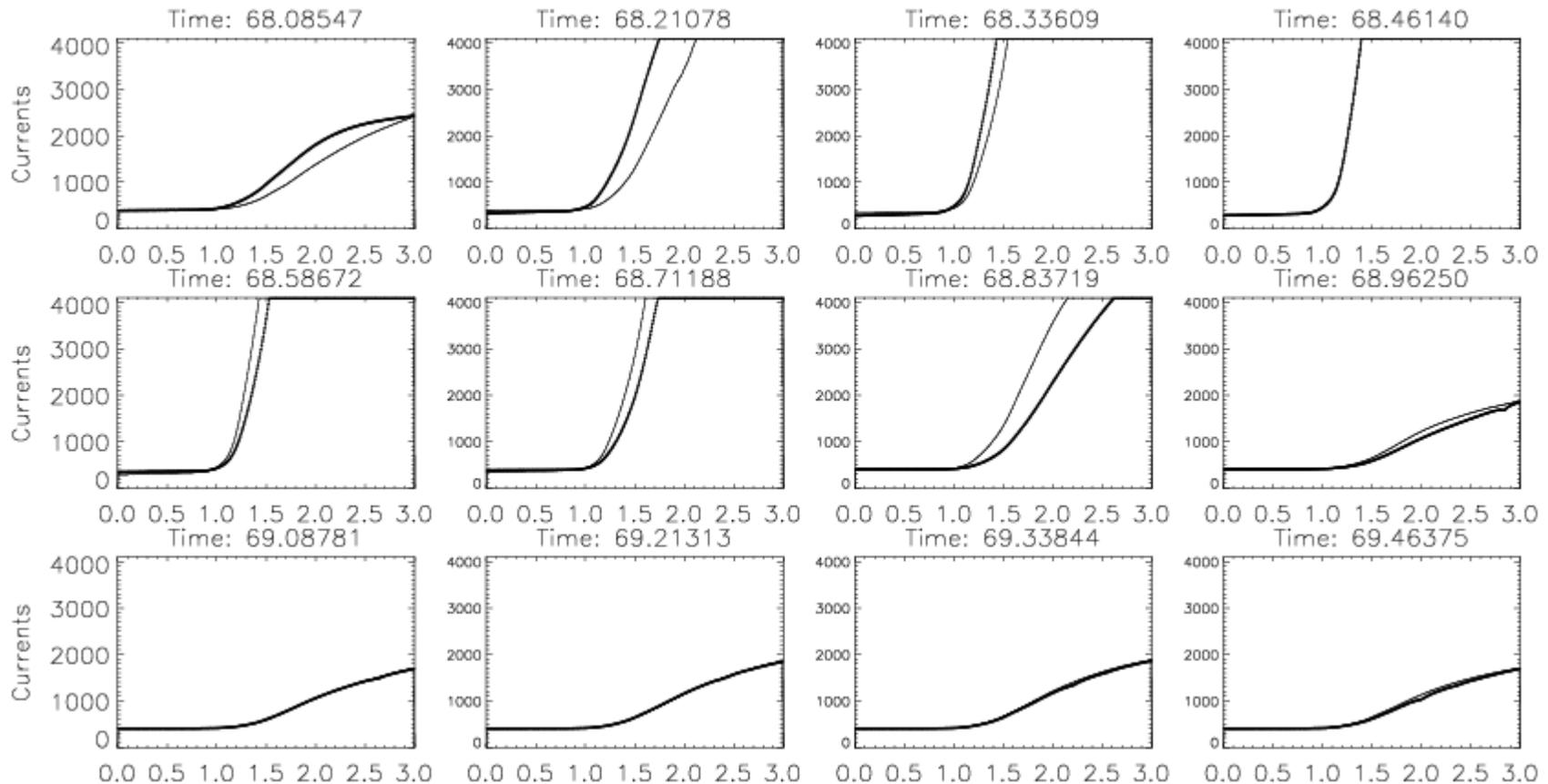
Rocket	Site	Date	Time (LT)	Es Alt [km]	Es Wide [km]
Nike Apache 14.230	Croatan	1965/4/5	08:45	113.9	0.86
Nike Apache 14.244	Wall.	1965/9/15	15:25	106.8	3.2
Nike Apache 14.360	Wall.	1968/7/24	12:00	100.1	1.36
Nike Apache 14.361	Wall.	1968/7/24	16:36	107.3	1.63
Nike Cajun 10.320	Wall.	1970/7/16	16:36	102.4	1.05
S-520-29	USC	2014/8/17	19:10	98	0.69

過去の研究より、Es層は平均的には約0.6-3 kmの厚さをもつことが分かっている。これらのデータと比較すると、本実験で観測されたEs層は非常に薄いと部類に属する。

Croatan : USS Croatan
Wall : Wallop Island
USC : 宇宙航空開発機構
内之浦宇宙空間観測所

Es層内の電圧-電流特性

細線: 三角波掃引電圧の上昇時
太線: 三角波掃引電圧の下降時



上昇時と下降時の電圧-電流特性に重なりが見られない. 変化のパターンが一様ではないため, プローブ表面の汚染によるヒステリシスが原因とは考えにくい.

Es層内で密度ピークに向かう電子密度増加時には電圧掃引上昇時よりも下降時が電流値が大きく, ピーク通過後の電子密度減少時には掃引上昇時の電流値が大きいため, この傾向は電圧掃引時間内に電子密度が変化したためであると考えられる.

解析方法の変更

Es層内では電圧掃引時間内に電子密度が変化し、通常的手法では正しい密度と温度が得られないため、ロケット上昇時Es層の前後において以下の方法で解析を行った。

1. 図1のように、0~3 Vまでの各電圧における電流をピックアップする。

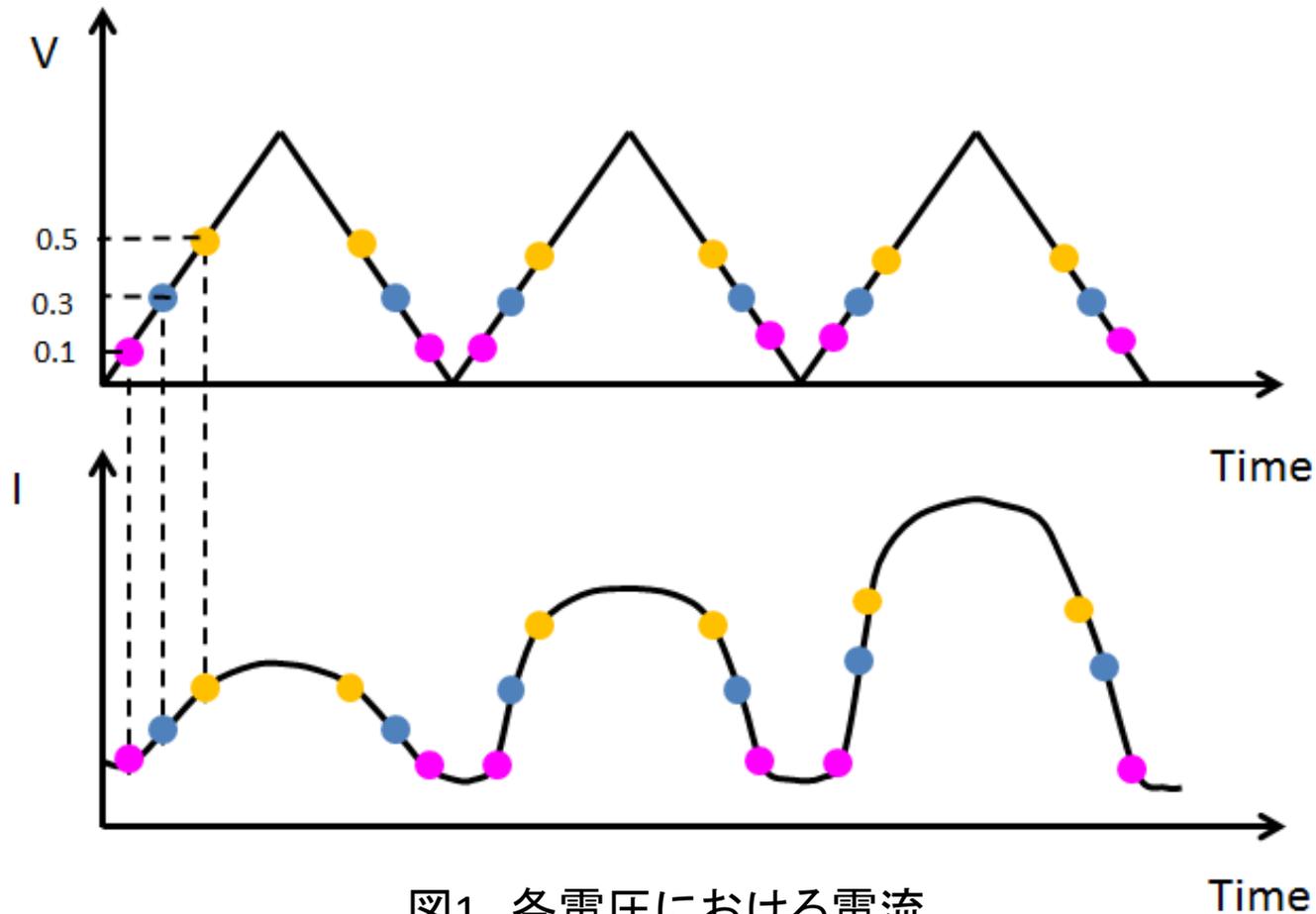


図1 各電圧における電流

- ピックアップした電流値を電圧毎にそれぞれ時間を追ってプロットし、それらの電流に対してスプライン補間により近似を行う(図2).
- このような近似を行うことで、図3のように任意の点(時間)においてある電圧を印加した場合の電流値を導き出すことが出来る.
- この作業をEs層が観測された前後の66~71秒で行った. その後、電子密度・温度を求めていく.

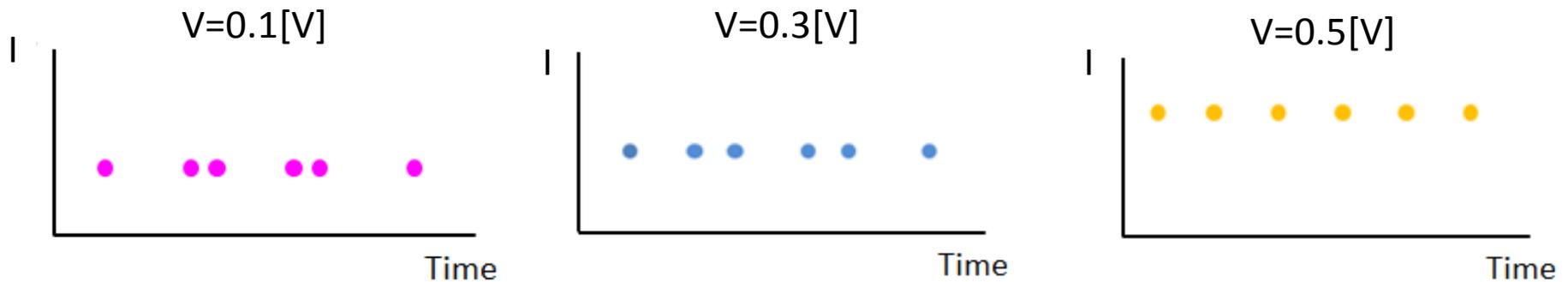


図2(上図) ピックアップした電流値. この後、スプライン補間を用いて点と点を滑らかな曲線をつなぎ、近似式を求める.

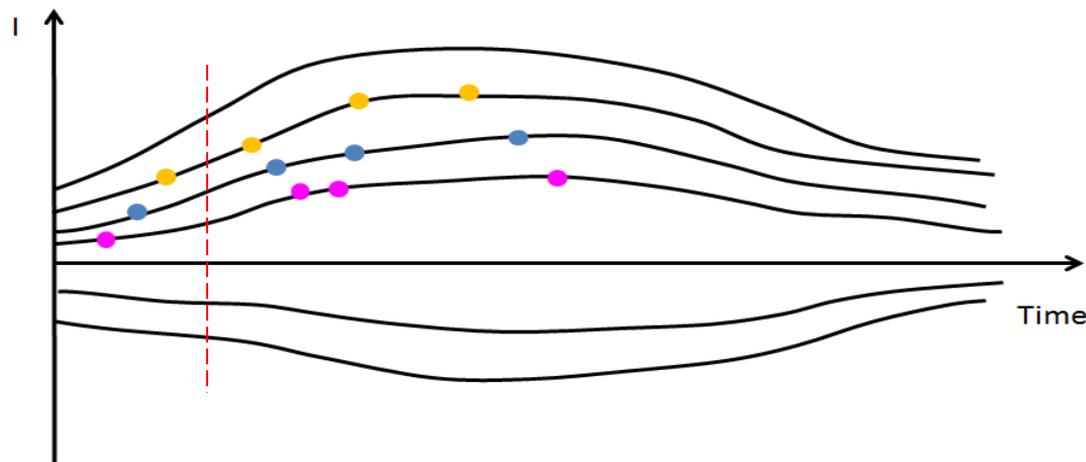
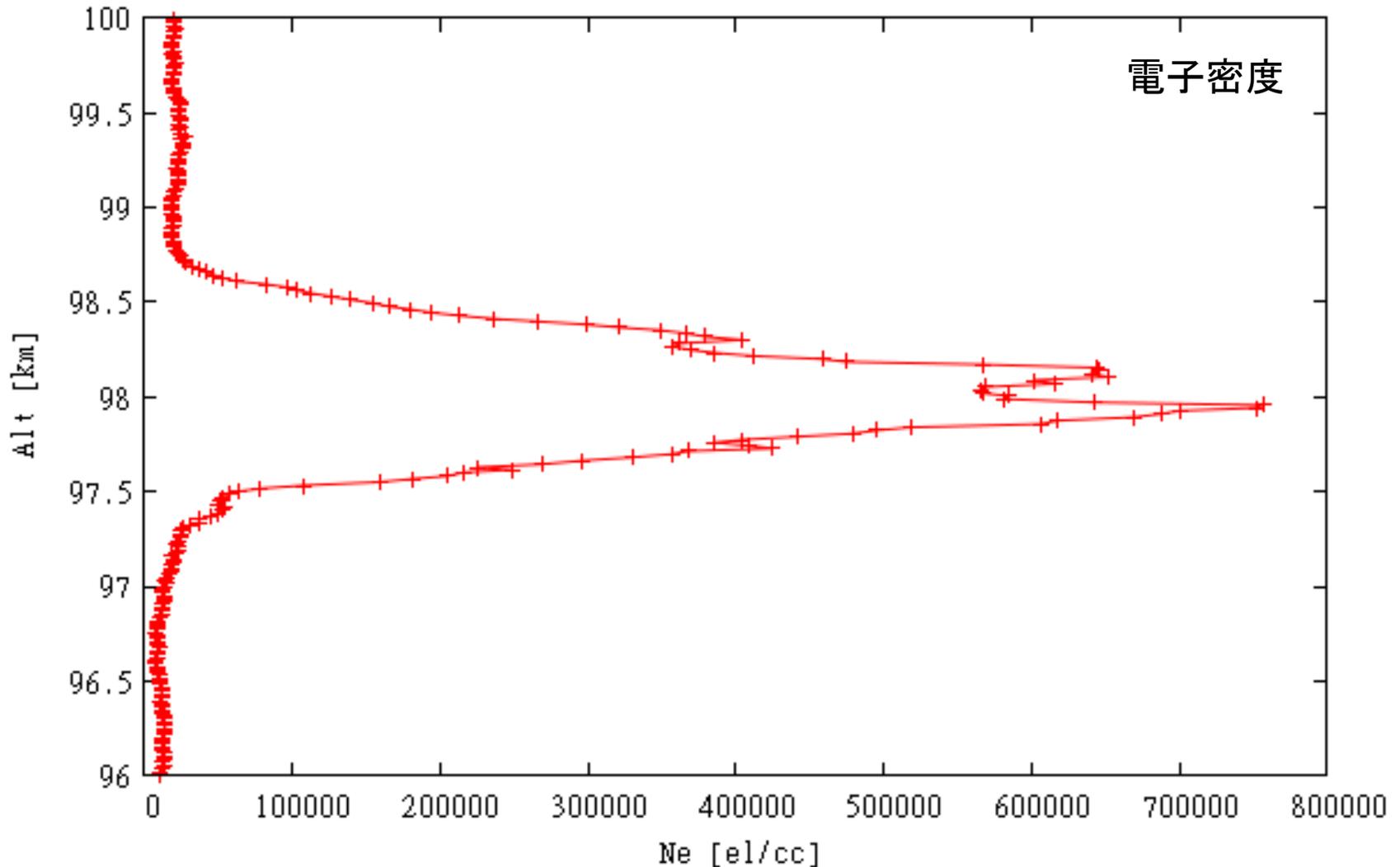
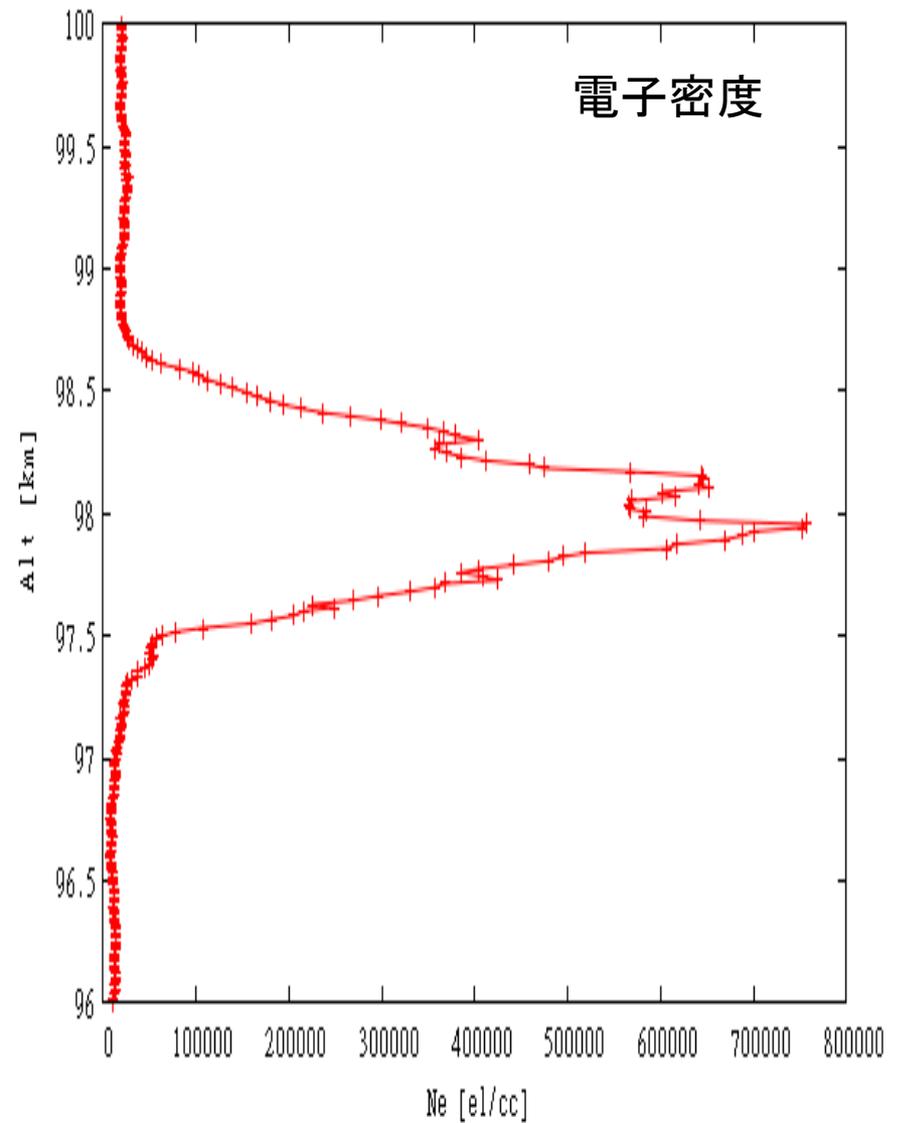
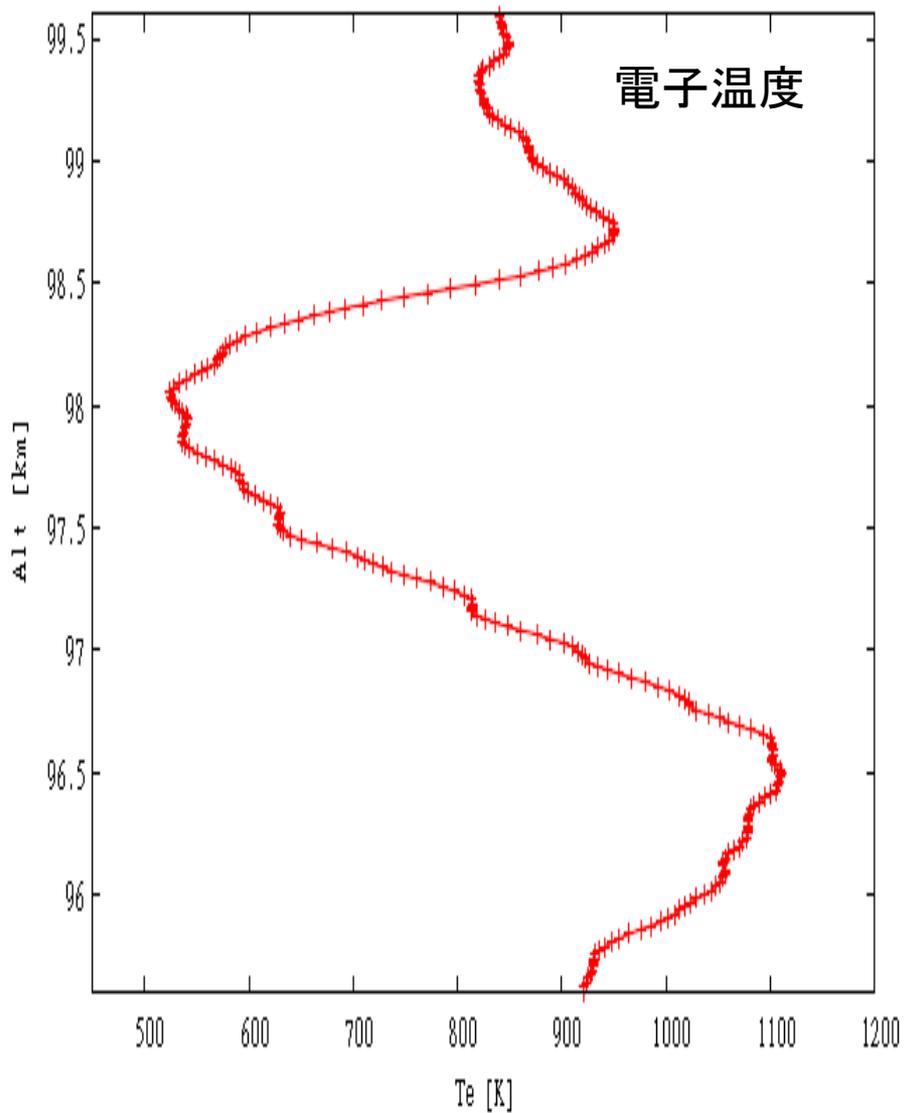


図3(左図) 近似式を用いて、任意の点(破線)における電流を求められる.

新たな解析方法を用いて計算した電子密度



半値幅を用いて厚さを定義したところ, 0.7 kmとなった. また, 密度 4×10^5 el/cc 付近に不連続性が見られるが, これは電圧が低いデータだったため補間がうまくできなかったためと考えられる.



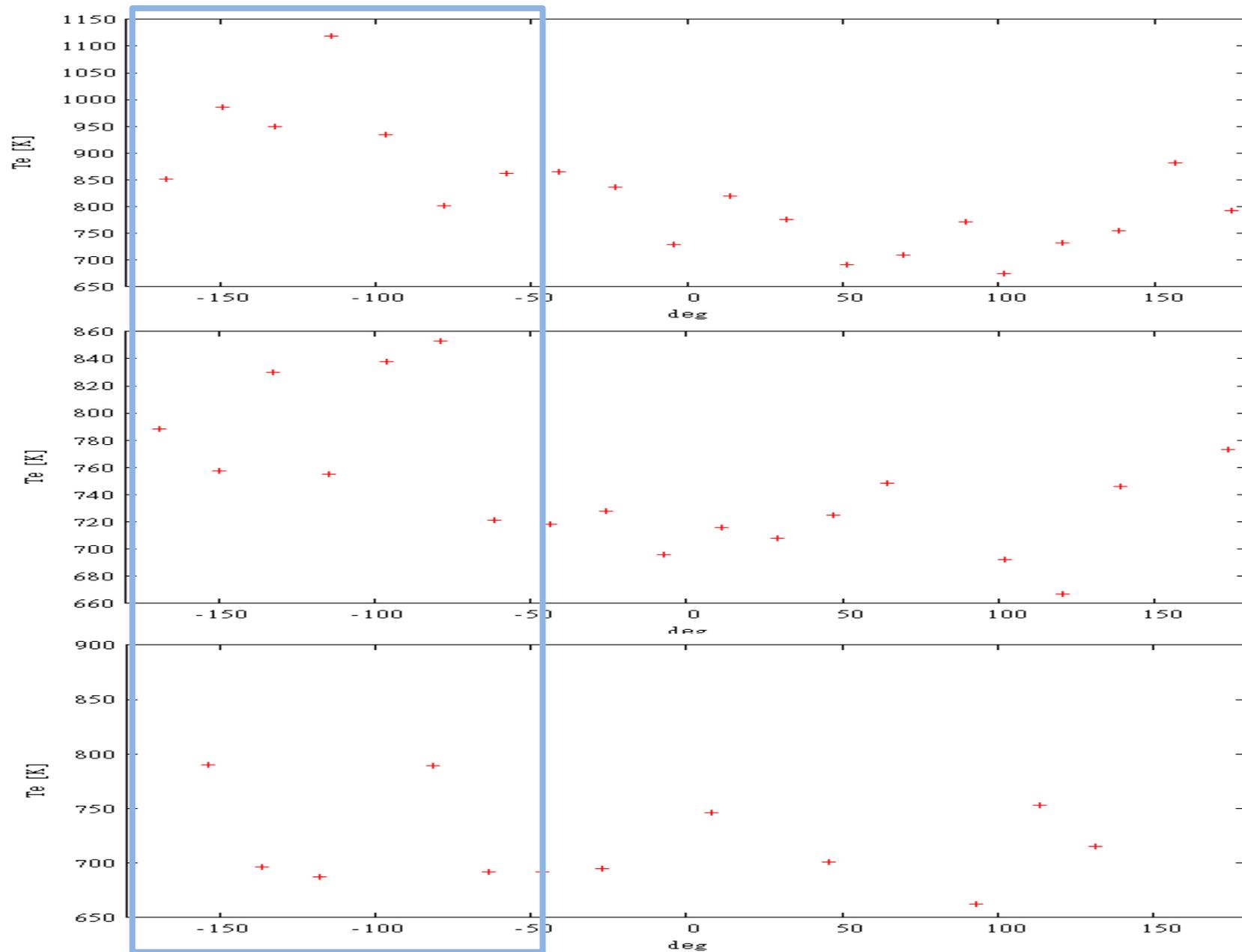
電子温度は16点の移動平均をとったデータを示した。

Es層内の温度は周囲の温度と比較すると最大で約600 K低いことが分かった。また、高度方向の電子密度変化の幅に比べて、電子温度の幅の方が広いことが分かる。

ロケットのウェイクについて

- 一般的に、電子密度よりも電子温度の方がウェイクの影響が顕著に表れるとされている.
- E_s 層よりも上部において、ロケットのspin位相角と電子温度の関係をグラフ化し、ウェイクの影響を受けているかを検証した.
- 実際にどのspin位相角がロケットのウェイクになっているかを知るにはロケット姿勢を正確に求める必要があるが、ウェイクの影響は特定の方角で繰り返し観測されるはずのため、位相角に対する電子温度の変化を調べた.

温度の高い点(枠線内の点)は, ウェイクの影響を受けているものと思われる.



まとめ

- ロケット上昇時には高度98km付近に最大電子密度 $7.5 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$, 下降時には高度100km付近に最大電子密度 $1.9 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ のEs層が存在していたと推測される.
- ロケット上昇時に観測されたEs層の厚さは約0.69~0.7kmであり、Es層の厚さとしては非常に狭い部類に属する.
- Es層内での電子密度は変化が急激で従来の方法では正しい電子密度・温度が推定できないため、新たな手法を導入して解析を行った. これによって、高度方向に0.02kmステップで電子密度・温度を推定することに成功した.
- Es層よりも高い高度のデータにおいて、ロケットのウェイクによる影響と思われる電子温度の上昇があることが確認できた.