

FLP (Fast Langmuir Probe) による電子温度と密度の観測

阿部 琢美¹・小山 孝一郎¹

Observations of the electron temperature and density in the low ionosphere by Fast Langmuir Probe

By

Takumi ABE¹ and Koh-ichiro OYAMA¹

Abstract: "S-310-33" sounding rocket was launched from Uchinoura Space Center in Kagoshima on Jan 18th, 2004. The Fast Langmuir Probe (FLP) onboard the rocket was developed to measure the electron temperature and number density above 80 km altitude in the ionospheric D and E regions. These data are used to investigate the generation mechanism of wavy airglow structure which is a main scientific topic in the present sounding rocket experiment, together with the atomic oxygen density and the neutral wind simultaneously measured on the rocket. The FLP can provide a spatial distribution of the electron temperature and density along the rocket trajectory, which will also be used to discuss the dynamics and energetic in the lower thermosphere.

During the rocket flight, the FLP successfully measured the voltage versus current relationship of the probe, from which the electron temperature and density can be estimated, despite a minor problem with the electronic circuit. Both the electron temperature and density indicate a spatial structure which suggests a possible existence of the dynamical process. It is noticeable that the FLP observed very steep gradient of the electron density at 89 km altitude.

概 要

S-310-33号機は大気光縞々構造の生成メカニズムの解明を主目的として2004年1月18日0時30分に鹿児島県内之浦宇宙空間観測所から打ち上げられた。本ロケットに搭載されたFLP（高速ラングミュアプローブ）は高度約80 km以上での電子温度、電子密度を測定するために開発された。これらのデータは同時に測定される酸素原子密度や中性大気の流れとともに議論に用いられ、特に熱圏下部における中性大気と電離大気間の熱エネルギー収支と力学、運動量輸送に関する総合的な研究が行なわれる。

ロケットの飛行時にはFLPは一部不具合があったものの、良好なデータを取得して電子温度と電子密度を算出することが可能であった。観測データからは局所的な温度構造、密度構造が

¹宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部

得られた他、飛翔時に高度89km付近に著しく密度勾配が急な領域が存在したことを明らかにしている。

1. 測定器

本観測に用いられたプローブはステンレス製の円筒（直径3mm×長さ約20cm）形状でロケットの機体から垂直に伸展した状態で測定を行う。プローブには振幅4.0V、周期200msの三角波を印加し、流れ込んだ電子電流、イオン電流をアンプで増幅した後テレメータ出力する仕組みになっている。こうして得られた電流・電圧特性（ラングミュアカーブ）に適切な数値処理を施し電子温度、密度を推定する。

正確な電子温度測定を妨げるプローブの電極表面の不純物による影響を避けられるよう、次のような手法でプローブを真空ガラス封じ（Oyama and Hirao, 1976）とした。

- 1) ステンレス製プローブをやすりで磨いた後、アルコールで洗浄。
- 2) 直径10mmのガラス管にステンレスプローブを封入した。
- 3) 温度100℃以上で24時間熱しながら真空引きを行い、表面の汚染物質を除去する。
- 4) この高真空で排気した状態でガラス管を封じる。

ロケットに搭載されたガラス封じプローブは、ロケット打ち上げから61秒後の高度約68km付近でタイマーによりガラス管が割られた。打上げ時、機軸に平行だったプローブはその2秒後に垂直方向になるようバネの力により展開を行なった。ガラス管はロケットのスピンのよる遠心力のため、外側に放り出される。

電子密度の変化に対応して広いダイナミックレンジをもてるようプローブに流れ込むことによる電流はlowとhighのゲインの異なる2つのアンプにより増幅される。ゲインは次のように調整された。

観測モード	Full scale	
	Low Gainチャンネル	High Gainチャンネル
Gain Low mode (高度125km以上)	1.0 μ A	0.02 μ A
Gain High mode (高度125km以下)	0.5 μ A	0.005 μ A

イオン電流を含む電圧、電流特性をみるために、これらのアンプは+1Vのオフセット電圧をもっている。測定器の較正は30秒に1回、40 M Ω の抵抗にプローブをつなぎ替えることによって行った。

今回の実験においては、三角波スイープ電圧を印加するプローブ（スイープバイアスプローブ、以下FLPと呼ぶ）に加えて、電子密度の時間的変化をより高速でモニターするために固定バイアスのプローブ（CLP）を用意した。CLPに印加する電圧は+5V、ゲインはlowとhighの2種類を設けた。サンプリング間隔はlowゲインが10msec、highゲインが2.5msecである。2つのプローブは写真1のように機体上の同一面内に取り付けられ、同時に垂直方向に展開された。

2. 観測データと電子温度の導出

図1に打上げから80～122秒後（高度89～122 km）にFLPが測定した電流電圧特性の幾つかを示す。これらは後述するように、電子温度や密度が極小、あるいは極大となっている時間帯のものである。図は左から1と2列目および3と4列目の2つで特定の時間に取得された1組のデータを示しており、左側の図はプローブ電流を直接表示した（縦軸は任意スケール）ものでイオン電流と考えられる部分に直線でフィッティングを行なっている。右側の図は左側に示したプローブ電流からフィッティングによって近似したイオン電流を差し引き、電子電流を対数目盛りで表わしたものである。この図において直線部分にフィッティングした時の傾き（図に直線で表示）から電子温度（この場合約500～700 K）が求められる。

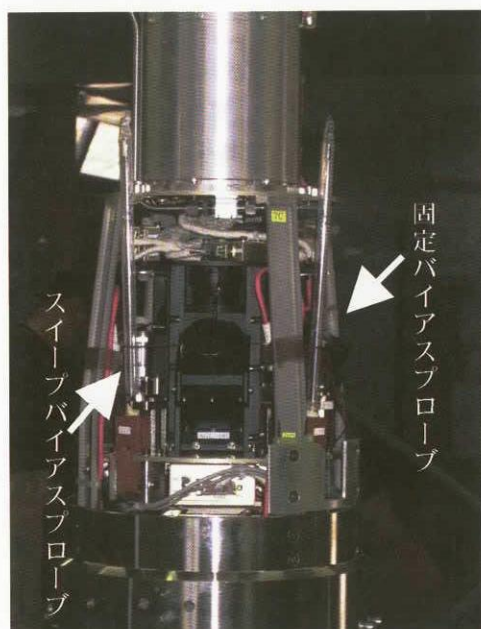


写真1 ロケット頭胴部に取り付けられたスweepバイアスプローブと固定バイアスプローブ
 わかった。ここに述べた結果はこのような理由によって印加電圧が変わったことを考慮して行った解析によるものである。

電子密度に関しては、電子密度の飽和電流付近にフィッティングした直線と電子温度を求める際にフィッティングした直線との交点における電流値から求めるといった方法を用いた。これらの直線が各々の図に描かれている。

3. 観測結果

1. 印加電圧の異常

本来FLPに印加する三角波スweepの周期は上り100msec下り100msecの計200msecになるはずであった。ところが実際の観測データでは上りの周期が2割弱短めに、下りの周期が2割長めになっていることがわかった。また、較正データからプローブに印加された電圧の振幅が4Vではなく約5Vである事が推定されている。さらに、プローブの出力電圧に対して周波数約200Hzの小振幅交流成分が重畳していることも見出された。その後の検討の結果、これらの予期しなかった一連の現象は集中電源から供給される-18Vの電圧を-12VにするFLPの電子回路部内のレギュレータが不具合を生じ、-18Vの電圧で回路に入力される時に生じることが

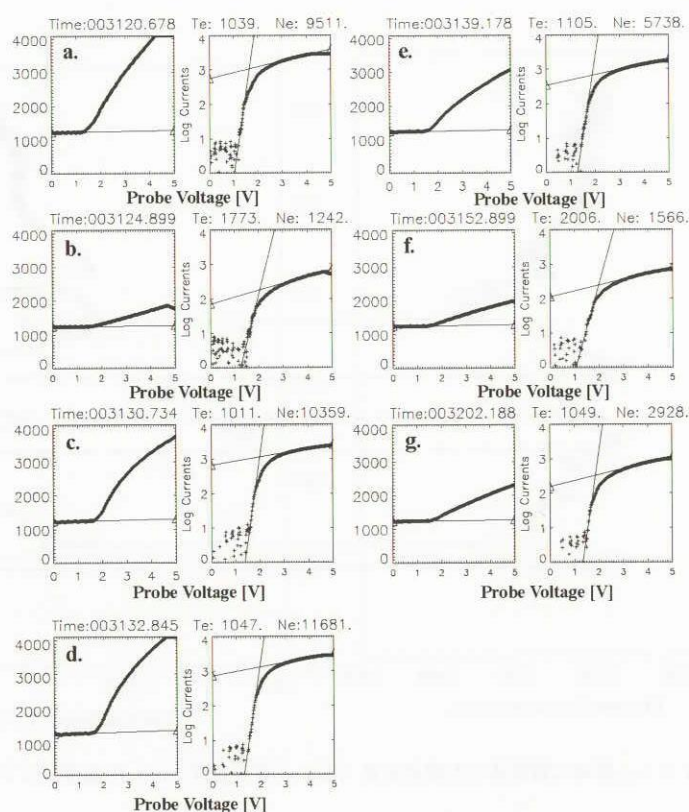


図1 FLPによって得られた電流電圧特性

(1, 3列目: リニアスケール。イオン電流に直線でフィッティング。数字は時刻。2, 4列目: イオン電流をプローブ電流から差し引いたものを縦軸対数スケールで表示、直線部分にフィッティングして求めた電子温度を上部に記した)

2. 電子温度・電子密度プロファイル

FLPが測定した電流電圧特性に対するフィッティングにより得られた電子温度と電子密度を図2（上昇時）と図3（下降時）に示す。ここでは約200msec毎に得られる電子温度の5点毎の移動平均を求め、高度を縦軸にとり表示を行っている。なお、電流電圧特性に対して適当なフィッティングが出来ないデータは除外して平均を求めた。電子温度は概ね800K～1700Kの範囲に存在し、局所的な温度構造をもっている事がわかる。

今回のロケット飛翔時には、高度約89km付近(a)に電子密度の急峻な勾配が存在したのが大きな特徴である。図2、図3では高度89km以上にのみデータが存在しているがこれ以下の高度においては電子密度が低すぎるため、温度密度ともに算出できなかった。この高度における密度の急激な変化については後に議論を行う。高度89km以上では総じて予想外に電子密度が高く、このためFLPのLow gainチャンネルのデータにおいても飽和電子電流部分がオーバーレンジになっているデータが得られている（高度102～105 km, 108～113 km）。このような場合、飽和電子電流に対するフィッティングが出来ないため電子密度は算出することが出来ない。

2つのプロファイルと比較すると、高度90(A1), 103(A2), 111km(A3)においては電子温度が極小で電子密度が極大、高度92(B1), 107(B2), 118km(B3)においては温度が極大で密度が極小という逆相関の変化が特に低高度において明らかである。このような傾向は極大と極小の高度に違いはあるが、ロケットの下降時にも観測されている。電離圏E領域の電子密度の局所的な増大に関してはWind Shear理論（Whitehead, 1989, 1990）のように狭い高度領域に逆方向の中性風が存在する時に $V \times B$ ドリフトによってプラズマがはき集められるという考え方がある。しかし、電子密度と同時に電子温度にも変化が認められることは、この領域の電子が単なる力学的効果だけでなく、加熱等のエネルギーの授受を伴う過程に影響を受けていることを示唆しているのかもしれない。

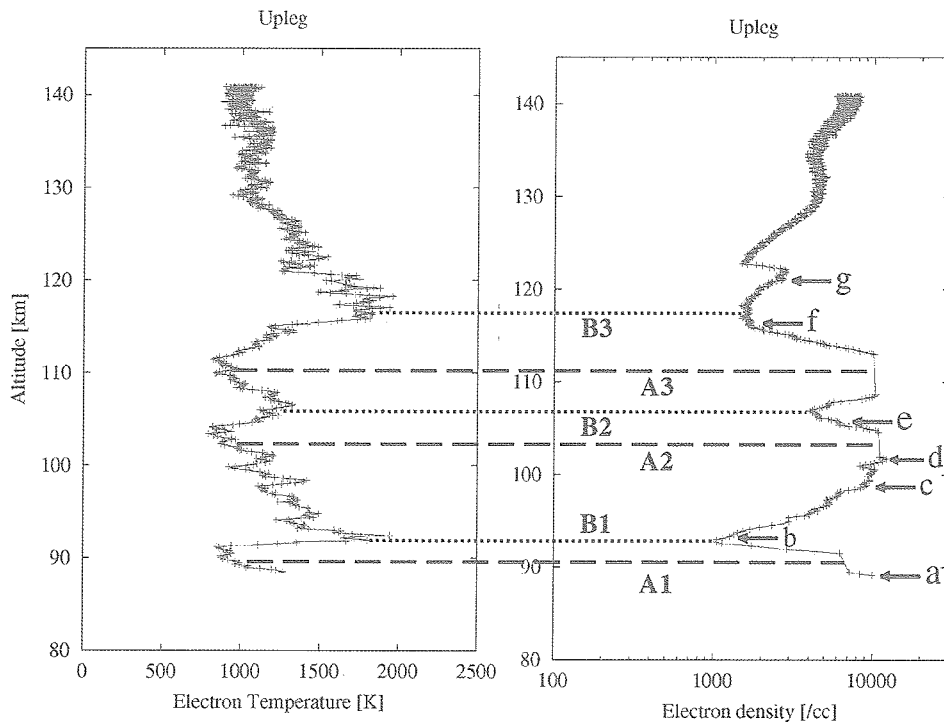


図2 ロケット上昇時に観測された電子温度（左）と電子密度（右）の高度プロファイル

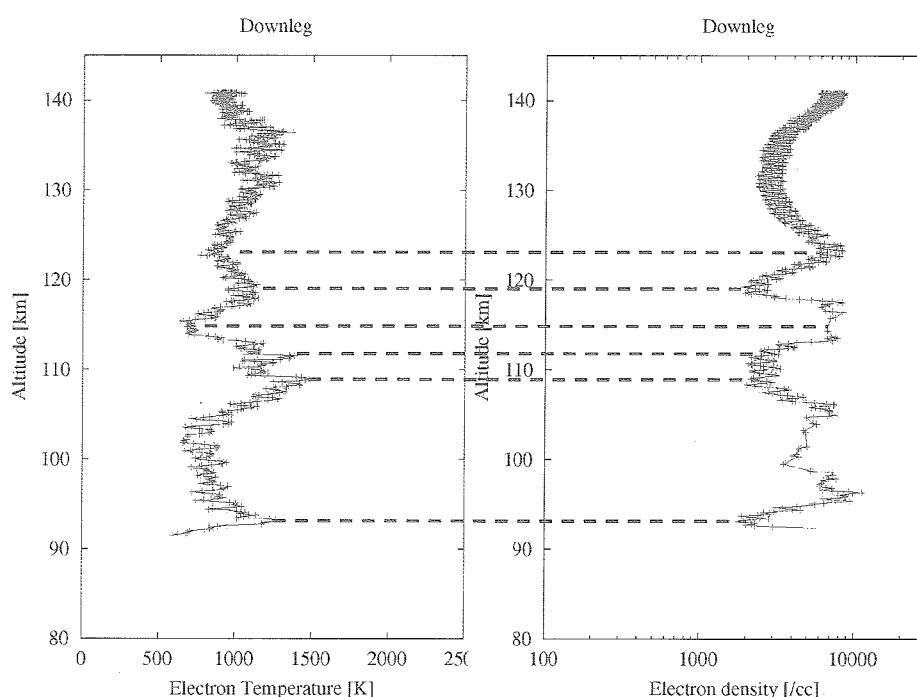


図3 ロケット下降時に観測された電子温度（左）と電子密度（右）の高度プロファイル

3. 2つのプローブによる観測値の比較

CLPは+5Vの電圧を印加した場合の飽和電子電流を測定しているが、この電流値は電子温度と電子密度の関数として与えられることが知られている。ここでは、FLPから求めた電子温度の値とCLPで測定された電流値を用いて電子密度の算出を行い、この値とFLPから求めた電子密度の比較を行う。高度88～93 kmで得られたデータに関して、この手法で得た2つの電子密度を示したものが図4である。CLPには2種類の電流利得が設けられているので、High gainとLow gainの両者を示しているがHigh gainチャンネルは88.36 km以上で電流値が飽和しているため一定値になっている。Low gainチャンネルに関しては88.39～91.60 kmにおいて電流が飽和しており、同様に正確な値が得られていない。91.7 km以上の高度においてLow gainチャンネルの電流は飽和せず、電子密度を算出すると $0.8\sim 6.0 \times 10^3 / \text{cm}^3$ の値となる。この電子密度がFLPから求めた値に近いことは2つの測定方法の信頼性を相互に支持するものである。なお、CLPから算出された電子密度がFLPに比べてより細かな空間構造を示しているのは、前者のサンプリング周期（10msec）が後者（約100msec）よりもはるかに短いことによる。

4. 高度89kmにおける電子密度勾配

前に述べたようにこのロケット飛行時の観測データの特徴として、高度89km付近の狭い領域で電子密度が急激に増加していることがあげられる。図5にこの遷移領域である88.3～88.5 kmの高度においてCLPから得られた電子密度を示した。High gainチャンネルのデータは88.36 km以下で有意なデータを取得、Low gainチャンネルは88.36～88.39 kmにおいて有意なデータを得ている。両者を考慮すると電子密度は高度88.36 kmでは $3.66 \times 10^1 \text{ cm}^{-3}$ 、88.39 kmでは $6.72 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ となって、僅かに高度30mの範囲内で2桁以上も電子密度が異なっていることとなる。電離圏D領域の電子密度に関しては観測ロケットS-310-30号機に搭載されたCLPが高度85 km、90 km付近に急な勾配を観測した。しかし、これらは数倍から10倍程度の密度差であり遷移の高度幅も今回の現象に比べて広がった。このような著しい密度勾配が本当に存在したのか（測定上の問題点は無いか）、存在したとすればどのようなプロセスにより作り出されるのかについては今後解明を進めていく必要がある。

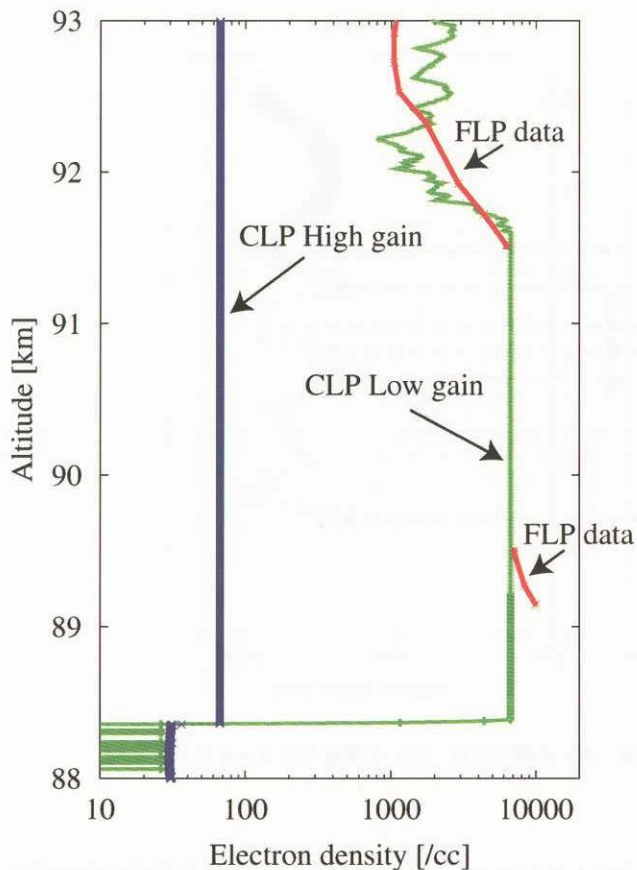


図4 高度88kmから93kmにおける電子密度。CLPとFLPから求めた値を比較している。

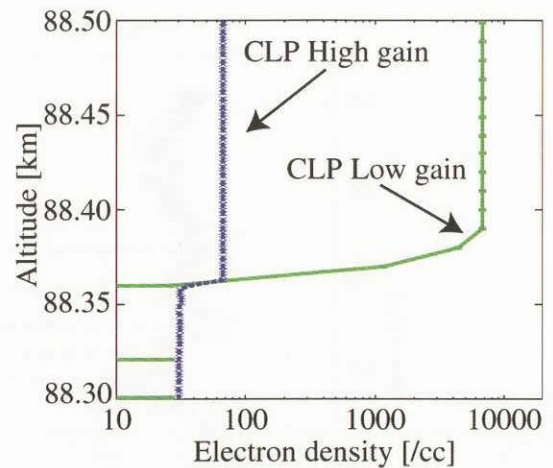


図5 高度88.3kmから88.5kmにおける電子密度。CLPから求めた値のみ表示。

4. 謝 辞

FLP電子回路部とプローブ展開機構部の製作は株式会社エーディーによって行われました。ここに感謝の意を表します。

真空ガラス封じプローブの製作にあたっては大阪市立大学工学部の南繁行先生にお世話になりました。この場を借りてお礼を申し上げます。

参 考 文 献

- [1] Oyama, K.I. and K. Hirao, Application of a glass-sealed Langmuir probe to ionosphere, Rev. Sci. Instrum., 47, 101-107, 1976.
- [2] Whitehead, J.D., Recent work on midlatitude and equatorial sporadic-E., J. Atmos. Terr. Phys., 51, No.5, 401-424, 1989.
- [3] Whitehead, J.D., Sporadic E layers - History and recent observations, Adv. Space Res., 10, No.10, 85-91, 1990.