

S-310-27号機によるDCプローブ測定

—Es層中の電子温度について—

(1999年10月18日受理)

吉村玲子*・今村剛**・阿部琢美**

Measurement of T_e in the Es layer using the DC probe onboard the rocket S-310-27

By

Reiko YOSHIMURA*, Takeshi IMAMURA and Takumi ABE

Abstract: Mid-latitude sporadic E (Es) layers have been observed for a long time and the formation mechanism based on the wind shear theory is currently accepted among the science community. However, no satisfactory theory which discusses the energetics of the Es layer exists because of the lack of the accurate electron temperature measurement.

v - i characteristic curves were obtained by means of a glass-sealed Langmuir probe onboard the rocket S-310-27 which was launched on the 25th, January, 1998. Detail study of the v - i characteristic curves clearly shows the effect of the secondary electrons from the electrode surface, which should be taken into account to derive the accurate daytime electron density from the ion-current region of the v - i characteristic curve.

The careful analysis of the ion current shows the wavy structure in the height profile, which is concluded to be produced by the internal gravity wave. The electron temperature in the Es peak which appeared at the height of 92-93 km was about 500 K higher than of the possible neutral temperature (about 200 K).

In this report, we will discuss the reliability of these results and provide the basic informations to study the energetics of the Es in the future studies.

概 要

中緯度スプラディック E 層 (Es) の観測は古くから行われており、その生成機構については wind shear 理論をもとに多くの研究がなされている。しかし Es 付近の熱収支に関しては、特に重要なパラメータの一つである電子温度の正確な測定例が少ないため、未だ明確な議論がなされていない。今回、観測ロケット S-310-27 号機に搭載されたラングミュア・プローブにより、高度 92~93 km に発生した Es 付近の電子温度及び電子密度の測定を行った。電子密度の高度分布には、プローブ表面に太陽紫外線が照射されることによる 2 次電子の影響が如実に現れている。これを除去することによって、大気波動に伴う wind shear が存在したことを示唆する波状構造が得られた。また Es 付近の電子温度を算出

* 東京大学理学系研究科

** 宇宙科学研究所

した結果、Es ピークではその前後と比べ数 100 K の上昇を見せていることがわかった。本報告書では、その信頼性について議論し、今後 Es 形成機構及び熱収支を含めた研究に関する基礎的な情報を得ることを目的とする。

1. 序 章

1.1 本研究の目的

1998 年 1 月 25 日、オゾンの総合観測を目的としたキャンペーンの一環として、観測ロケット S-310-27 号機が打ち上げられた。ロケットは高度 92~93 km 付近でスボラディック E 層 (sporadic E layer: Es) を通過し、電子温度測定器として搭載されたラングミュア・プローブ (Langmuir probe) によって極めて良好なデータを取得することができた。中緯度 Es の観測、研究は古くからなされており、その生成機構としてよく知られているのが wind shear 理論である。しかしこの理論は単に電子密度の高度分布を議論しているのみにとどまり、Es 層の熱エネルギー収支には立ち入っていない。電子温度は超高層大気の高層構造を決定する上での基本的パラメータのひとつであり、特に熱圏の微視的熱収支を考える上で必要な要素であるが、Es 層内での電子温度観測の例は極めて少ない上に古いものが多く、且つ信頼性に乏しいために、Es 層内の熱エネルギー収支に関する研究は近年でもほとんどなされていない。本研究では、観測ロケット S-310-27 号機に搭載されたラングミュア・プローブによって得られたデータから、Es 層内での電子温度及び電子密度を算出し、その信頼性について議論した。

1.2 これまでの電離圏観測

1.2.1 電離圏下部における電子温度の直接観測

電離圏とは、高度約 50~1000 km 付近の、大気が主に太陽放射によって電離している領域のことを言う。その存在は 19 世紀末から地磁気学者達が地上の磁場変動を説明するために予言し、20 世紀初頭、無線通信の実用化により本格的に認められるようになった。その後電波伝播の分野から研究が行われ、地上から短波のパルス電波を打ってその反射を観測する vertical sounding の実用化 (Breit and Tuve, 1926)、電離気体中での電磁波伝播理論 (Appleton and Farnett, 1926)、太陽放射起源による光電離現象としての電離圏生成論の確立

表 1.1 1969 以前の電子温度観測 (Oyama and Hirao, 1979)

Data	Rocket	Time of flight	Firing site	Experimenter	R_z	Probe	Remarks
SA ₁		67/10/24/1314	Arec.	Sagalyn and Wand	93	RPT	
SA ₁		67/10/27/1314	Arec.	Sagalyn and Wand	125	RPT	
B ₁	NASA 1852	68/5/17/1518	Arec.	Brace <i>et al.</i>	59	d.c.	
B ₂	NASA 1806	68/8/26/1351	Wall.	Brace <i>et al.</i>	77	d.c.	
B ₃	NASA 1851	68/8/8/1410	Wall.	Brace <i>et al.</i>	113	d.c.	
B ₄	6.07	63/4/18/1604	Wall.	Brace <i>et al.</i>	34	d.c.	
S ₁	14303	66/11/12/1300	Cass.	Smith <i>et al.</i>	80	d.c.	
S ₂	14275	67/1/31/1350	Wall.	Smith <i>et al.</i>	109	d.c.	
S ₃	14270	66/6/14/0418	Wall.	Smith <i>et al.</i>	31	d.c.	
A ₁	Rocket 1	68/3/30/1057	Volg.	Andreyeva <i>et al.</i>	154	d.c.	Es at 105 km
A ₂	Rocket 2	69/1/21/1100	Volg.	Andreyeva <i>et al.</i>	85	d.c.	Es at 97 km
A ₃	Rocket 3	69/1/23/1459	Volg.	Andreyeva <i>et al.</i>	88	d.c.	Es at 92 km
A ₄	Rocket 4	69/6/10/1104	Volg.	Andreyeva <i>et al.</i>	120	d.c.	Es at 109 km
G ₂	2007	68/8/29/1415	Thum.	Gupta <i>et al.</i>	64	d.c.	
G ₁	2008	68/8/29/2300	Thum.	Gupta <i>et al.</i>	64	d.c.	

Arec.: Arecibo, Puerto Rico, 18°3'N, 66°75'W.

Wall.: Wallops Island, VA, U. S. A., 37°50'N, 93°49'W.

Cass.: Cassino, Brazil, 32°12'S, 52°10'W.

Volg.: Volgograd, U. S. S. R., 48°41'N, 44°4'N.

Thum.: Thumba, India, 8°54'N, 77°E.

表 1.2 1970年代の電子温度観測 (Oyama and Hirao, 1979)

Data	Rocket	Time of flight	Firing site	Experimenter	R_z	Probe	Remarks
T	SL 502	72/4/3/1035	Woom.	Timothy <i>et al.</i>	13	a. c.	
S_1	NA 14.514	73/8/10/1005	Wall.	Schutz <i>et al.</i>	27	d. c.	E_s at 100.5 km
S_4	NA 14.513	73/8/3/1100	Wall.	Schutz <i>et al.</i>	21	d. c.	E_s at 101.6 km
S_3	NA 14.476	71/8/20/0444	Wall.	Schutz <i>et al.</i>	82	d. c.	E_s at 108.5 and 114.6 km
S_2	NA 14.475	71/8/20/0419	Wall.	Schutz <i>et al.</i>	82	d. c.	E_s at 118.5 km
Z	NC 3256	74/6/29/2031	WSPG	Szuszczewicz and Holmes	30	a. c. (pulse)	E_s at 106 km
K_1	K-9 M-55	76/9/16/1100	Kago.	Hirao and Oyama	14	a. c.	
K_2	K-9 M-47	74/9/19/1100	Kago.	Hirao and Oyama	51	a. c.	
K_3	K-9 M-30	71/1/16/1615	Kago.	Hirao and Oyama	67	a. c.	
K_4	K-9 M-32	70/9/27/1542	Kago.	Hirao and Oyama	87	a. c.	
A_1	C-62	64/10/5/1630	Hamm.	Aubry <i>et al.</i>	0	a. c.	E_s at 105 km
A_2	C-63	64/10/7/1642	Hamm.	Aubry <i>et al.</i>	20	a. c.	E_s at 104 km
IJ	20 : 11	71/4/25/1100	Thum.	Oyama and Hirao	44	a. c.	
UJ	14.532	75/5/28/1526	Chil.	Smith <i>et al.</i>	13	a. c.	
K_5	S-210-7	72/2/17/1700	Kago.	Oyama and Hirao	137	d. c.	
K_6	K-9 M-38	72/2/22/1500	Kago.	Oyama and Hirao	167	a. c.	(clean probe)

Woom.: Woomera, Australia, 31°S, 137°E

Kago.: Kagoxhima, Japan, 131°05'E, 31°15'N.

Hamm.: Hammaguir, Sahara, Alferia.

Chil.: Chilca, Peru, 12°30'S, 76°47'W.

(Chapman, 1931) によって急速に発達していった。以後この領域に関しては地上からの電波観測を始め様々な手法で観測が行われており、1950年代後半からはロケット及び人工衛星による直接観測もされるようになり、今日までに電離圏の電子温度直接観測は数え切れないほど多く行われている。

表 1.1, 1.2 及び図 1.1 に 1960~70 年代に行われたロケットによる電子温度観測の例を示す (Oyama, 1979)。図中に示されている網掛けの領域はこれ以前に観測された中性大気温度を集めたものであり、これらの観測において問題となっているのは、中性大気温度と比べ電子温度が高く現れていることである。この原因についてはいまだ明確にされていないが、1960年代に観測されたものに関しては、電極表面の汚染の問題が挙げられる。ラングミュア・プローブ法とは、プラズマ中に電極を置き、印加電圧をスイープさせ、その電流-電圧特性から電子温度、密度を算出する方法であるが、電極に不純物が付着していると、その等価回路は電気容量 C_c 、抵抗 R_c を含んだものとなり (図 1.2-A)、特性曲線 (ラングミュア・カーブ) にヒステリシスが生じてしまう (図 1.2-B)。印加電圧のスイープ速度を遅くすると C_c の影響はなくなり、電流は R_c の抵抗を流れることになるが、この際プローブに印加される電圧の実効的な値 V_{eff} は、

$$V_{eff} = \frac{V_p(R_s + R_p)}{R_s + R_c + R_p} \quad (1.1)$$

となって実際のプローブ電圧 V_p よりも小さくなるためプローブ電流は小さくなり、温度は高く見積もられてしまうことになる。

このような問題の解決策として、主に2つの方法が考案された。そのひとつは pulsed plasma probe (Szuszczewicz *et al.*, 1975) である。これは図 1.3 に示すようにパルスのプローブ電圧を印加し、不純物による抵抗 R_c の影響を取り去ろうとするもので、その際に生じるフローティング電圧のシフトから電子温度を求める方法である。

もうひとつは真空ガラス封じプローブ (glass sealed probe) であり、今回のロケット実験ではこちらを使用

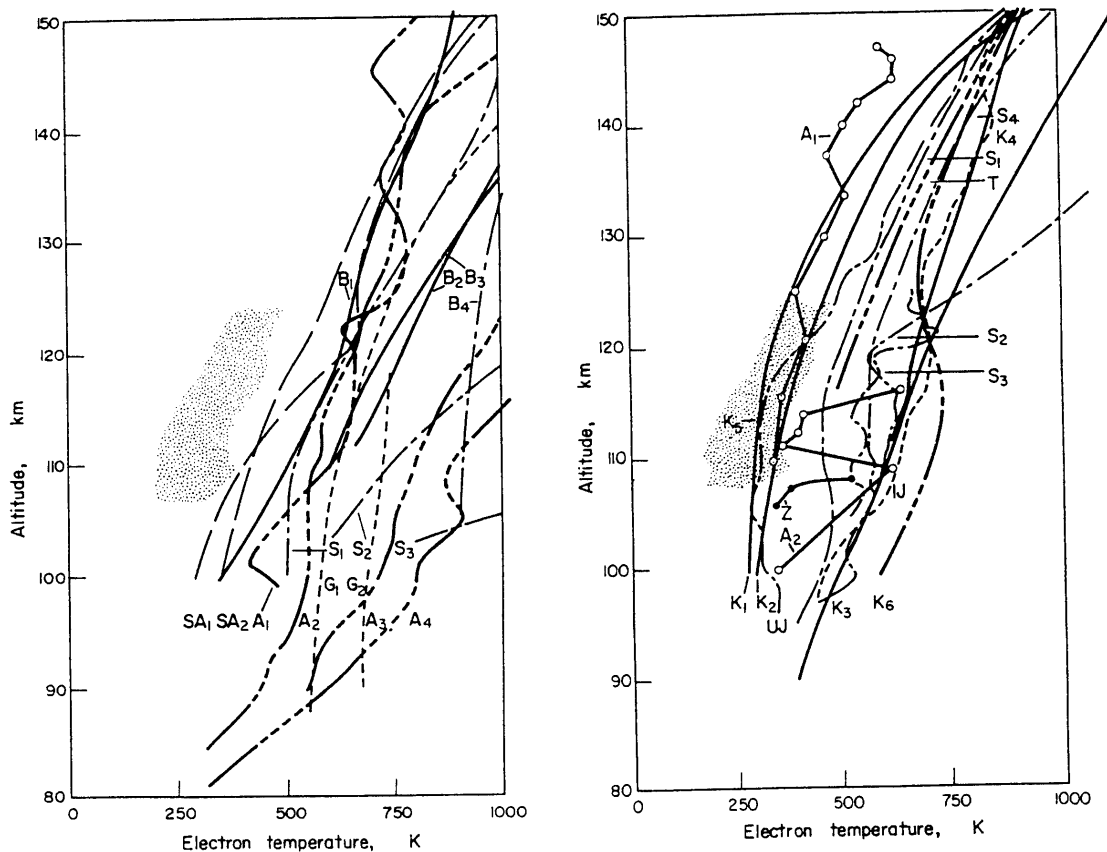


図 1.1 過去における電子温度観測結果 (Oyama and Hirao, 1979)

している。電極に付着している不純物の組成は、電極表面から蒸発するアウトガスの分析から主に H_2O であることがわかる。よって、電極を熱照射ランプによって 200°C に熱しながら約 50 時間真空ポンプで引き、ガラスで封じることにより、ロケット打ち上げ直前までプローブを大気から守ることができる (Oyama and Hirao, 1976)。このように、飛翔体による直接観測から高い電子温度が見積もられる原因としては、1960~1970 年代前半は、プローブ表面の汚染およびロケット周辺の中性大気の大気力学的な加熱によるものとする考えが主流であり、(Sagalyn and Smiddy, 1967, Smith *et al.*, 1968)、ロケット搭載プローブによる直接観測と ISR (Incoherent Scatter Radar) による地上観測との比較から経験的に線形補正を行う方法などがとられていた (Carlson and Sayers, 1970, Sagalyn and Wand, 1971)。その後上記のような解決をはかって行われた 1970 年代以降の観測例をみると、1960 年代のものよりは若干温度は下がっているものの全体として中性大気温度よりは高く、その幅は約 500°K ほどにもなる。

そこで 1970 年代後半になると、電離圏下部において電子温度と中性大気温度がほぼ等しいという事実に異論を唱える考えも現れ (Oyama and Hirao, 1979)、1980 年代に入ってから観測では、ラングミュア・カーブを二次微分することによって得られるエネルギー分布関数から、振動励起された O_2 , N_2 が低エネルギー電子の熱源となっているという可能性が示唆されており (Oyama and Hirao, 1985)、 N_2 の振動エネルギーが高いとき熱電子はエネルギーを得ることが理論的にも示されている (Paniccia *et al.*, 1986)。それ以降、ロケットによる電子温度直接観測は、論文として世に出ているものはほとんどなく、この問題は置き去りにされたまま今日に至るが、このことについての議論は本研究では行わないことにする。

1.2.2 Sporadic E 層の観測

Es 層 (sporadic E layer) に関しては、1960 年代初頭の wind shear theory を基準とし、以後多くの研究がな

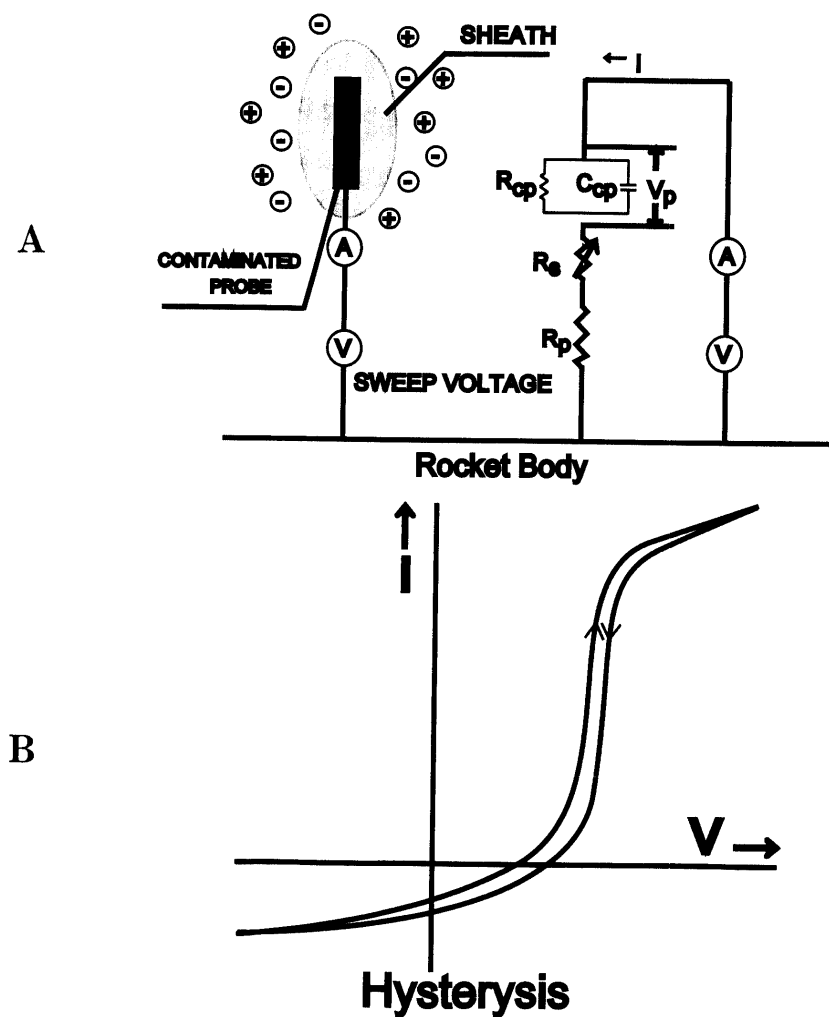


図 1.2-A, B プローブ表面に不純物が付着している場合の等価回路と、その際に得られるラングミュア・カーブに現れるヒステリシス

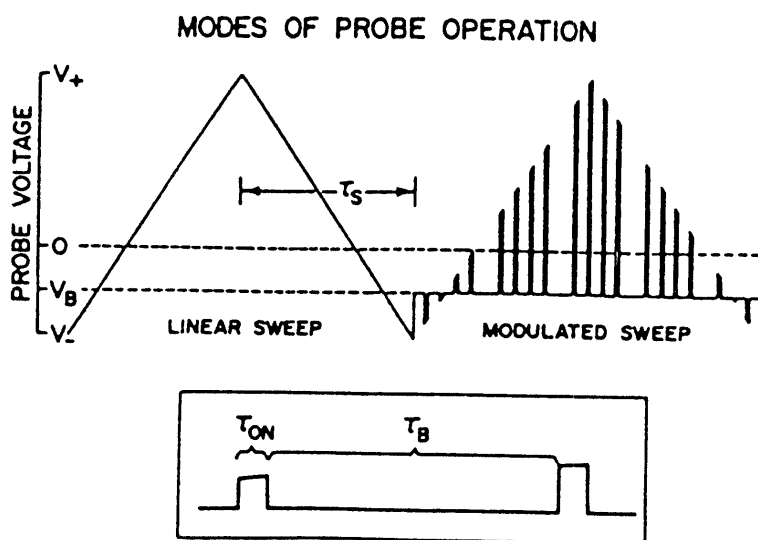


図 1.3 P³ (Pulsed Plasma Probe) に印加される電圧
従来図中 LINEAR SWEEP で表される電圧を印加するところを MODULATED SWEEP のような楕型の電圧とし、不純物による電気容量の影響を取り除く。

されている。中性大気に水平運動があると、電離気体には磁場の影響により鉛直運動が誘起される。ここで中性大気の水平運動に鉛直方向の shear が存在すると、電離気体の収束または発散が起こる。Es 層はこのような中性大気風の強い shear によって生ずるとする理論が受け入れられている (Whitehead, 1960)。これを簡単に説明したものが以下である。

座標系は、 x を東向き、 y を北向き、 z を鉛直上向きとする。定常状態のイオンの運動は、

$$0 = e(\mathbf{v}_i \times \mathbf{B} + \mathbf{E}) - \mathbf{F} \quad (1.2)$$

で表される。ここで、 e は電子の電荷、 $\mathbf{v}_i = (u, v, w)$ 、 $\mathbf{B} = -B_0(\cos I, 0, \sin I)$ は、それぞれイオン速度及び磁場ベクトル (I : 磁場伏角, B_0 : 磁場の絶対値)、 \mathbf{E} は電場である。また、 \mathbf{F} は粒子間の衝突による力であり、E 層では中性大気粒子との衝突が主で、イオン質量を M 、中性風の速度を $\mathbf{V}_n(U, V, 0)$ 、イオン-中性粒子間の衝突周波数を ν_{in} とすると、

$$\mathbf{F} = -M\nu_{in}(\mathbf{v}_i - \mathbf{V}_n) \quad (1.3)$$

となる。電場 $\mathbf{E} = 0$ のとき、イオンの鉛直方向成分 w は、

$$w = \frac{U \cos I \sin I + rV \cos I}{1 + r^2} \quad (1.4)$$

$$r = \nu_{in} / \omega_{ci}$$

$$\omega_{ci} = eB_0 / M$$

である。よってこのような風があるとき、イオンは図のように上下から集まって層を形成し、偏極電場によって電子が引き寄せられ、全体としての電気的中性は保たれている。図 1.4 は、上側で西向き、下側で東向きの中性風があり、磁場が紙面に垂直方向の時の状態を表したものである。この際、通常この高度に多い NO^+ 、 O_2^+ など、再結合係数が $\sim 10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ sec}^{-1}$ と大きな分子イオンはすぐに再結合し、ある程度の時間、層を形成し続けることが出来ない。再結合係数が小さい、流星起源といわれる金属イオン (Fe^+ 、 Mg^+ 、 Na^+ など; 再結合係数: $\sim 10^{-12} \text{ cm}^3 \text{ sec}^{-1}$) が主に Es を形成していることが観測からもわかっている。

これまでには主にレーダ観測から、Es 層の形成における大気波動の寄与及びプラズマ密度勾配領域での不規則構造と準周期的な反射 (Quasi Periodic Echo) 等については深く考察されているが (Mathews, 1998)、Es 層内の温度構造、熱収支についての議論は非常に少ない。前述の電子温度観測例の中で、Es 層内での電子温度観測を行ったものは全部で 11 例であるが (表 1.3)、このうち 6 例 ($A_1 \sim A_4$, H_1 , H_2) は 1960 年代に観測されたもので、先に述べたように電極汚染の問題が解決されていないため、信頼できるものとは言いがたい。1970 年代に入って観測されたものに関しては電極汚染の影響を考慮した計測がなされ、それなりに信頼性のあるものであると考えられるが、Schutz *et al.* による 4 機のロケット観測は、ロケットスピン (約 4.32 Hz) と印加電圧のスイープ周期 (0.5 sec) による変調を取り除く方法として 6~8 観測点ごとの平均を取って解析しているため (図 1.5)、電子温度の正確な議論はなされていない。Szuszczewicz and Holmes は P^3 (Pulsed Plasma Probe) を用いた Es 層内での細かい温度構造の観測に成功し、プラズマ密度勾配領域での電子温度について議論した。信頼できる Es 層内電子温度観測としてはこれが唯一のものであり、これによると、Es 層下端から上端に向かって電子温度が上昇していくという結果が得られている (図 1.6)。また Es 層内でのエネルギー収支の理論に関しては、Gleeson and Axford (1967) 及び Hooke (1969) による考察がある。これは熱源として光電子を仮定した場合の $T_e - T_n$ (T_e : 電子温度, T_n : 中性大気温度) の振る舞いについて考察したものであり、これによると T_e 及び $T_e - T_n$ は Es 層内では周囲と比べて低いという結果が得られている。粒子数密度が高くなると個々の粒子に分配されるエネルギーは減少するため、この結果は当然のことであると言える。彼らの理論によると Es 層内での熱収支は、

$$L_{en}^*(T_e - T_n)n_e = \frac{3}{2}kT_e^*an_{i0}n_{e0} \quad (1.5)$$

で表される。 L_{en}^* は電子-中性大気粒子間での衝突によるエネルギー損失の項であり、

$$L_{en}^* = 1.55 \times 10^{-15} n(N_2) + (5 \times 10^{-18} T_e - 1.0 \times 10^{-10}) n(O_2) \tag{1.6}$$

で表される。ここで、 T_e : 電子温度, T_n : 中性大気温度, n_e : Es層内での電子密度, n_{i0} , n_{e0} : Es層が形成されていない時のイオン密度または電子密度, α : 自由電子の再結合係数, k : Boltzmann定数, $n(N_2)$, $n(O_2)$: N_2 または O_2 密度である。熱源としては光電子のみを仮定しており、ここでは光電子の等価的な温度として $T_e^* = 8000 \text{ K}$ として計算されている。これによって得られる結果を図1.7に示す。

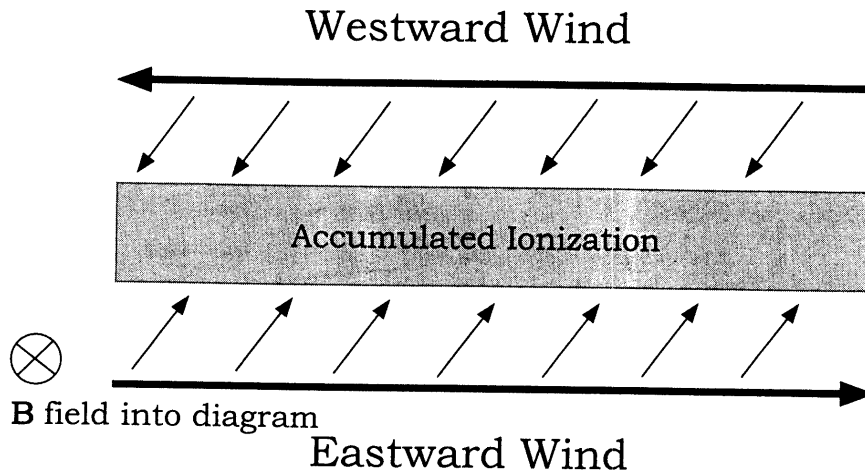


図 1.4 Wind shear 理論

プラズマ中に図のような東西風及び磁場が存在する場合、イオンが図中矢印に従って集まり、分極電場によって電子が引き寄せられてプラズマ密度の高い層が形成される。

表 1.3 過去における sporadic E 層内の電子温度観測

data	rocket	date	site	experimenter	Es alt. [km]	Ne [el/cm ⁻³]	Te (Es) /Te
H_1	C.33	64/05/08/1922	Hamm.	Aubry <i>et al.</i>	110 (up) 94 (down)	$\times 10^4$ $\times 10^4$	<0.85 <0.85
H_2	C.63	64/10/05/1630	Hamm.	Aubry <i>et al.</i>	105	$\times 10^5$	2
A_1		68/03/30/1057	Volg.	Andreyeva <i>et al.</i>	105	1.5×10^5	1
A_2		69/01/21/1100	Volg.	Andreyeva <i>et al.</i>	97	5.1×10^4	1
A_3		69/01/23/1459	Volg.	Andreyeva <i>et al.</i>	92	1.7×10^4	1
A_4		69/06/10/1104	Volg.	Andreyeva <i>et al.</i>	109	3.2×10^5	1.1
S_1	NA 14.175	71/08/20/0419	W.A.	Schitz and Smith	118.7	2.7×10^4	0.9
S_2	NA 14.476	71/08/03/0444	W.A.	Schutz and Smith	114.6 (up) 108.5 (down)	2.9×10^4 8.0×10^3	0.95 0.95
S_3	NA 14.513	73/08/03/1100	W.A.	Schitz and Smith	101.6	2.6×10^5	0.96
S_4	NA 14.514	73/08/10/1005	W.A.	Schutz and Smith	100.5	2.7×10^5	1.05
Z	NC 3256	74/06/29/2031	W.S.	Szuszczewicz and Holmes	106	$\times 10^5$	0.9

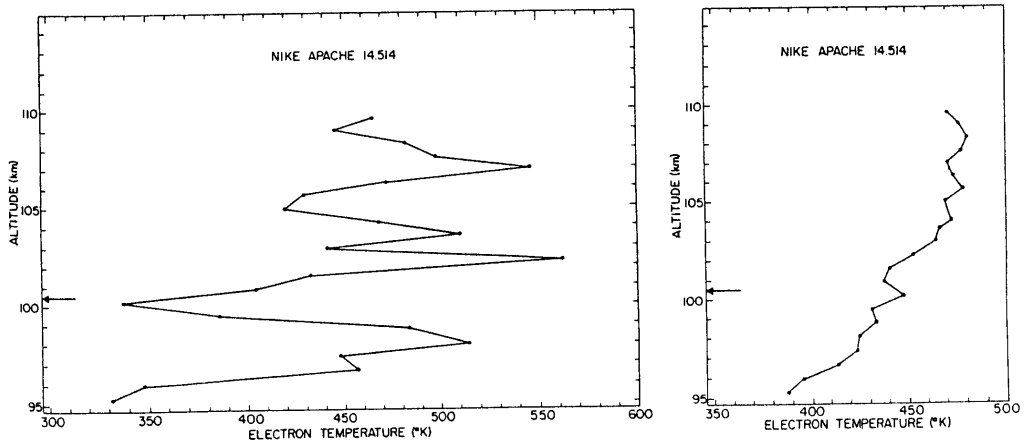


図 1.5 ロケット実験による Es 層付近の電子温度測定結果 (Shutz and Smith, 1976)
 左：実際の測定値，右：1 スピン毎 (7 点) の移動平均をとったもの。
 観測データ：1973.8.10.1005 LT, Wallops Island

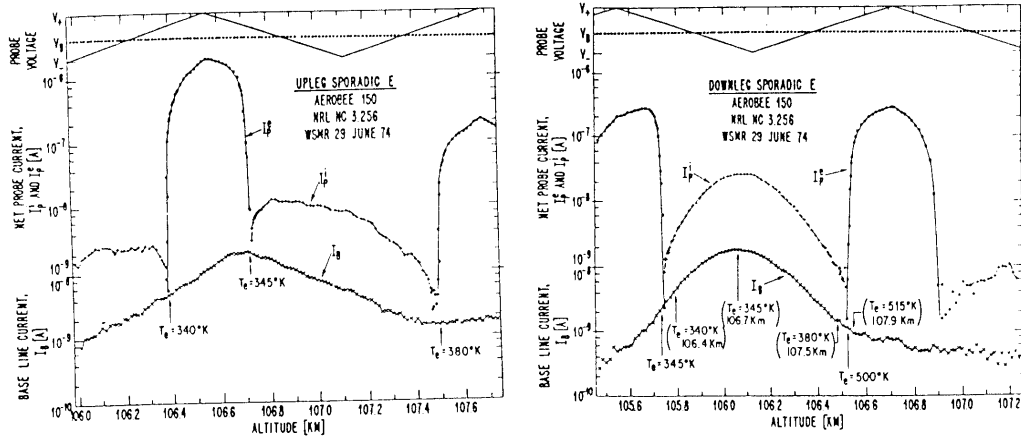


図 1.6 Es 内電子温度直接観測 (Szuszczewicz and Holmes, 1974). 観測データ：1974/06/29/2031MST, White Sands

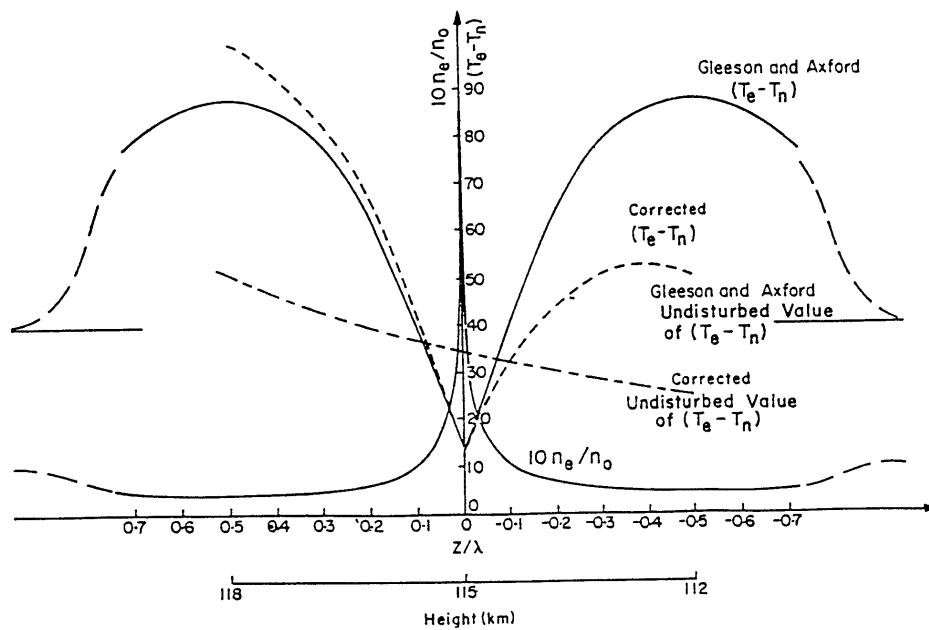


図 1.7 Hooke (1968) による Es 内温度構造モデル. T_e , T_n : 電子及び中性大気温度, n_e , n_0 : Es 内及びバックグラウンドの電子密度.

2. 観測ロケットによる測定

2.1 測定器

観測に用いた測定器は円筒ガラス封じラングミュア・プローブ（直径3 mm，全長210 mm，重量100 g）で，ステンレス棒（Ni：8～10%，Cr：17～19%，Mn：2%，Si：～1%，Mo：～0.6%，Fe Balance）を200°Cで50時間熱照射し，ガラス管で真空封じしてある（図2.1）。

回路図及び印加電圧を図2.2に，プローブ搭載位置と他の測定器との位置関係を図2.3，2.4に示す．断面図中，GAは地磁気姿勢計センサ（Geomagnetic Aspectometer），DSSは太陽方向検出器センサ（Digital Sun Sensor）で，それぞれスピン軸と地球磁場，スピン軸と太陽方向とのなす角を測定しており，これらの値からロケットの姿勢を決定する．LPがラングミュア・プローブであり，その他オゾン層観測のための測定器が搭載されている．

プローブには周期250 msec，振幅2.5 Vの三角波電圧が印加される．プローブ電流はフィードバック抵抗50 k Ω の電流アンプで電圧変換され，その後low（ $\times 1$ ），middle（ $\times 10$ ），high（ $\times 100$ ）の3つのゲインを持つアンプで増幅される．アンプ出力は，low，middle，high gainそれぞれのプローブ入力電流が1 μA ，0.1 μA ，0.01 μA の時に5 Vとなっている．しかしイオンによる負の電流を測定するために出力電圧には約1 Vのオフセットが加えられており，従って出力電圧は実際にはlow gainの場合0.8 μA で5 V，middle gainでは0.08 μA で5 V，high gainでは0.008 μA で5 Vとなる．また，アンプの入力側は30秒に1回40 M Ω の抵抗に接続され，キャリブレーションを行っている．

今回の実験では，プローブのすぐ近くにプリアンプ・ボックスを設置し，プリアンプに接続される全ての線に高周波フィルターをつけると共に，プリアンプ・ボックスそのものをアースより浮かし，メインアンプ・ボックスでアースを取った．このことにより，これまで往々にして深刻な干渉を引き起こしていたテレメータ電波の影響は完全に取り去られた．アンプからの出力電圧は8 bitのA/Dコンバータを持つテレメータ送信機に送られた．

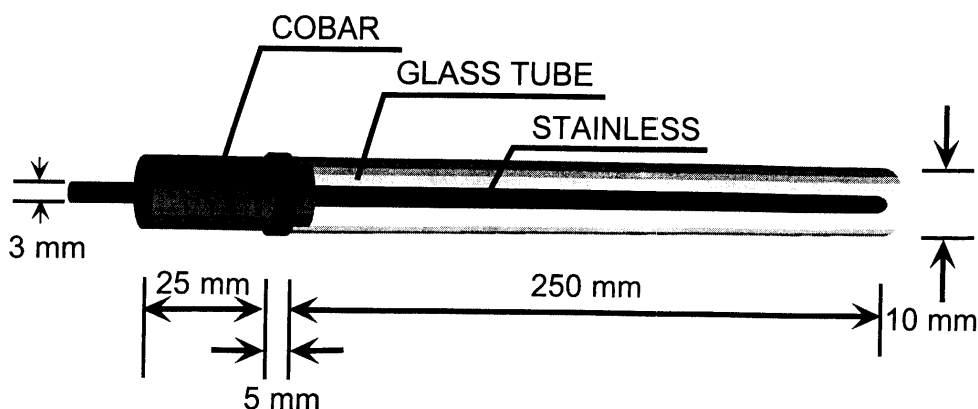


図2.1 円筒ガラス封じラングミュア・プローブ概略図
プローブ本体はステンレス製，直径3 mm，全長250 mm.

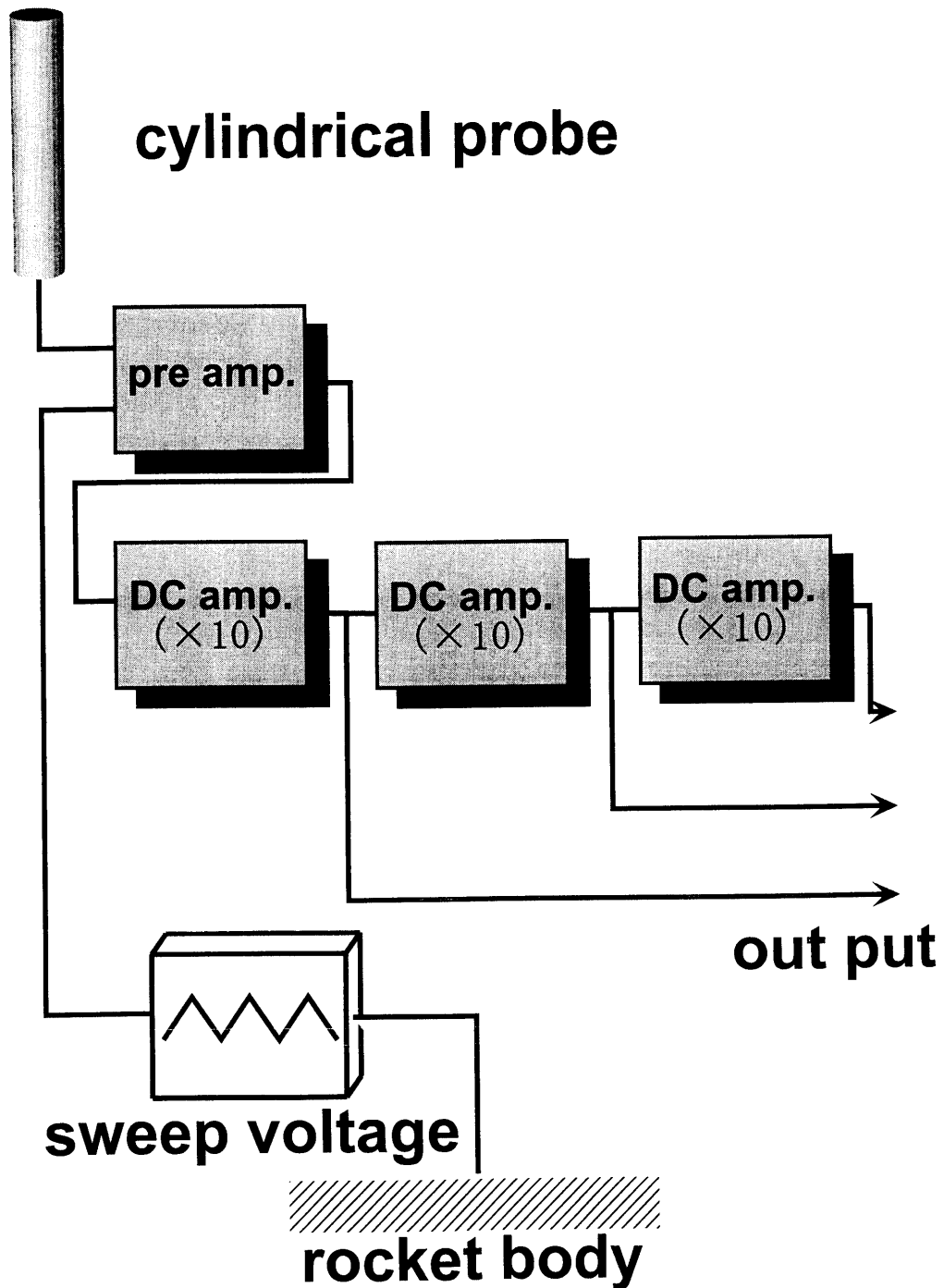


図 2.2 回路図

得られたプローブ特性は3つのゲインを持つアンプで増幅される。

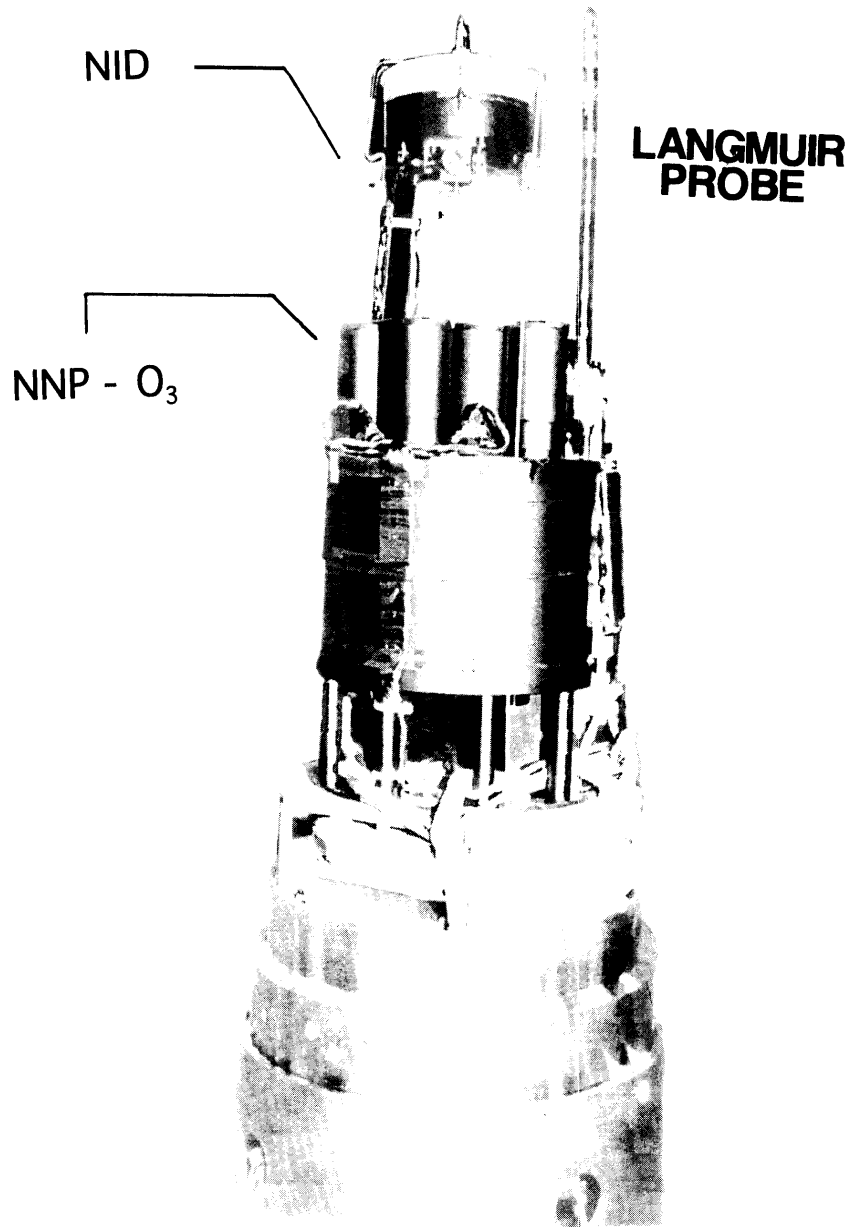


図 2.3 プローブ搭載位置(1)

図中 NID : エネルギー分布測定器, NNP-O₃ : オゾン密度測定器である.

プローブはロケットのノーズ・コーン開頭時にロケットスピン軸と垂直な方向に進展される.

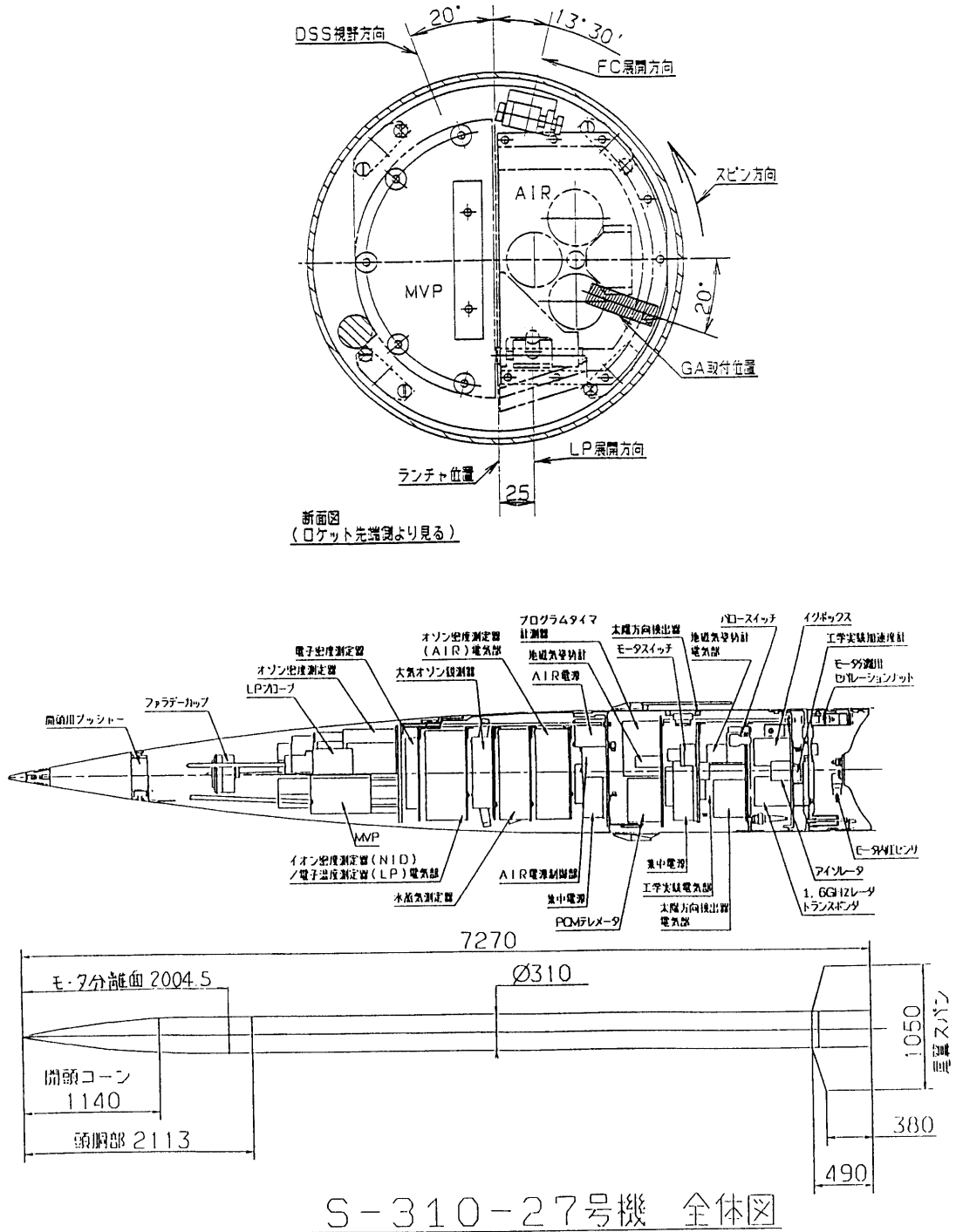


図2.4 プローブ搭載位置(2)
LP: ラングミュア・プローブ, DSS: 太陽方向検出センサ, GA: 地磁気姿勢系センサである。

2.2 観測環境

観測ロケット S-310-27号機は、1998年1月25日 17:35:00 JST、鹿児島宇宙空間観測所 (131°04'E, 31°15'N) から南東に向けて、打ち上げ角 74.5° で発射された。このときの打ち上げ環境を表 2.1 に、軌道図及び観測地点を図 2.5 に、この時のタイム・シーケンスを表 2.2 に示す。

ロケットは、打ち上げ後徐々にスピンを増し、スピン周波数約 2.5 Hz まで上昇した。発射後 43 秒 (高度約 50 km) でスピンドウンを行い、その後はほぼ一定 (1.04 Hz) のスピンレートを保っている。48 秒後 (高度約 58 km) のノーズコーン部分開頭後、プローブを真空封じしていたガラスを割り、50 秒 (高度約 60 km) でプローブはロケットスピン軸と鉛直方向に伸展し、掃引電圧が印加されデータを取得し始める。この際ガラスはロケットスピンによる遠心力で飛ばされる。ロケットは D 領域を通過後、高度 92.5 km 付近で Es 層を通過し、最高高度 182.5 km まで到達した後、下降時高度 91.2 km 付近で上昇時と同様 Es 層を通過した。また 210 秒 (最高高度付近) では、工学的実験の一環としてロケットモータ部分の切り離しを行っている。この時、鹿児島県山川 (130°06'E, 31°02'N) にある通総研電波観測所におけるイオノゾンデでも、微弱な Es 層を観測している。地上からある周波数をもった電波を電離圏に向けて照射すると、照射された電波がある特定の高度のプラズマ周波数に対応する周波数を持つとき、その高度で反射される。イオノゾンデはこの性質を用いたもので、地上から 1~25 MHz 程度の可変高周波で変調された電波パルスを送り、鉛直上方に発射して電離層からの反射波を受信し、イオノグラムから得られる見かけの高さと周波数の関係 ($h' - f$ 特性) から、電離層高度及び密度が算出される。図 2.6 上は打ち上げ前 (98/01/25/17:30 JST)、下は打ち上げ後 (98/01/25/17:45 JST) のイオノグラムである。この図によると、打ち上げ前は見かけの高度 100 km 付近 (電子密度 $2.0 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$)、打ち上げ後は見かけの高度 98 km 付近 (電子密度 $4.9 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$) で Es 層が現れている。一方、国分寺 (139°41'E, 35°38'N) で得られたイオノグラムには Es 層は見られなかった。また、この時の Kp 指数は 1、太陽フラックス $F_{10.7}$ は 83 である。

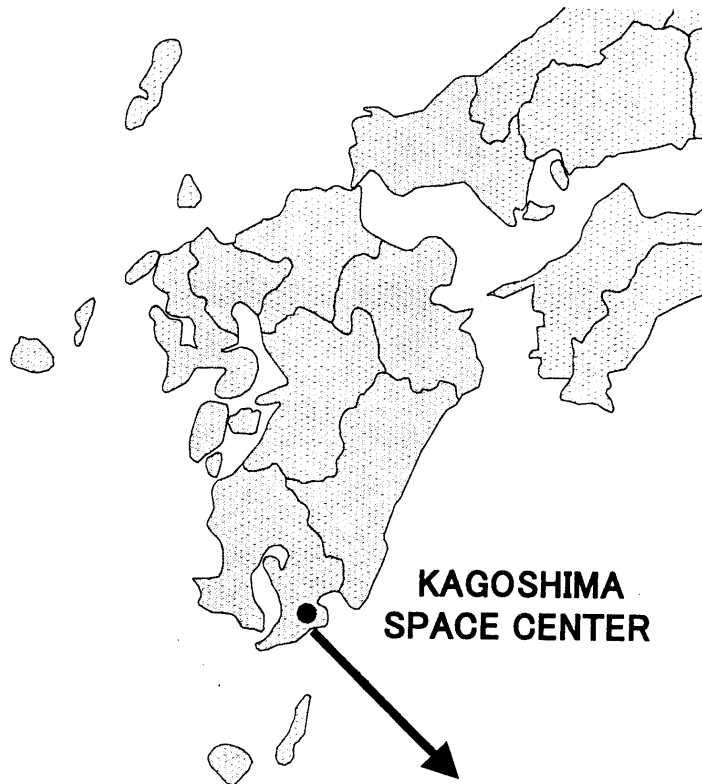


図 2.5 観測地点：鹿児島宇宙空間観測所 (131°04'E, 31°15'N) 1998.1.25.1735 LT 打ち上げ

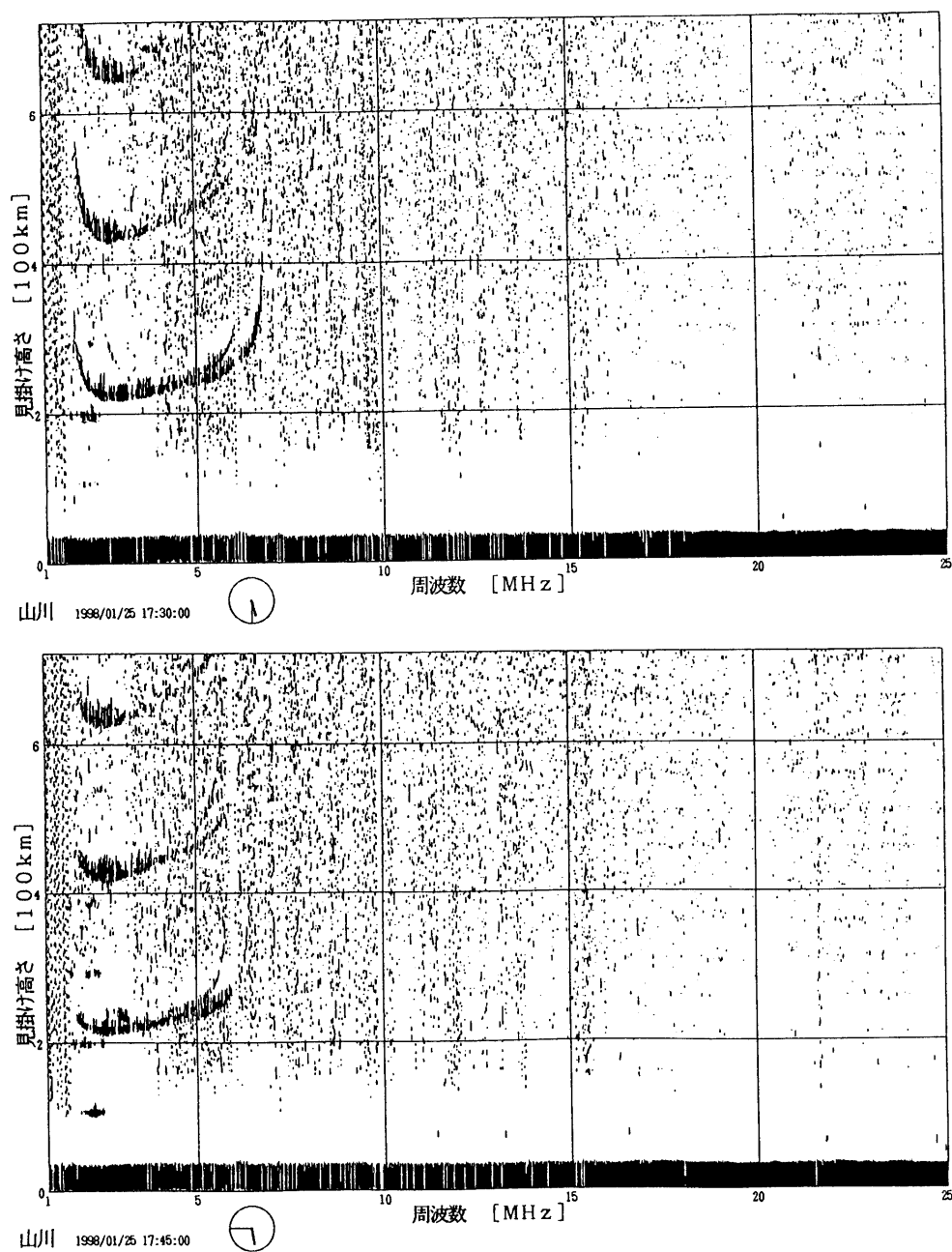


図 2.6 山川電波観測所 (130°E, 32°N) で得られたイオノグラム
 上：打上げ 5 分前，下：打上げ 10 分後。いずれも微弱な Es 層を検知している。

表 2.1 打ち上げ環境

spin rate	1.04 Hz
apogee	182.5 km
velocity at 100 km	1.49 km/sec.
velocity at 150 km	1.13 km/sec.
sample spacing at 100 km	186 m
sample spacing at 150 km	141 m
solar zenith angle	88.99
Kp index	1
F _{10.7}	83

表 2.2 タイム・シーケンス

設定秒時 (sec)	項目
X=0	モータ点火
43	YO-YO 点火
48	開頭
49	ラングミュア・プローブガラス割り
50	ラングミュア・プローブ伸展
210	ロケットモータ切り離し

2.3 観測結果

実際に得られた観測データを図2.7に示す。データは3チャンネルで取得し、図は上から high, middle, low gain で、横軸に時間 (sec.)、縦軸に電流値に相当するデシマル (decimal) 値をとっている。これら一つのカーブがラングミュア・カーブであり、これから温度及び密度を算出することになる。イオン電流及び電子電流はそれぞれイオン密度または電子密度の関数であるので、プローブ電流値はプラズマ密度の振る舞いを示す。図中 A (50 sec. 付近) はガラス割り、プローブ伸展、B (55~67 sec. 付近) は電離圏 D 領域であり、C (72.5 sec. 付近) で Es 層を通過している。D 領域では、プローブに流れるイオン電流と電子電流がほぼ同程度となってラングミュア・カーブが特異な形状を示しているが、これは電子電流に加えて D 領域特有の負イオン (O_2^- , NO_3^- など) による電流がプローブに流れ込んでいるためと思われる。D 領域の電流-電圧特性については解析を別の機会に譲ることとし、ここでは議論しない。図2.8-A は発射後 80 秒近辺 (高度 100 km 付近) において得られたプローブの電流-電圧特性を引き伸ばしたもので (横軸: 印加電圧値, 縦軸: 電流値, middle gain), B はその際にプローブに印加された掃引電圧であり, 印加電圧上昇時及び下降時に得られた電流-電圧特性を重ねてプロットしたものである (図中 '○': 印加電圧下降時, '×': 上昇時でのプローブ電流)。まず印加電圧 0 V の時に $0.12 \mu A$ のイオン電流が得られ, $0.7 V$ の時にイオン電流と電子電流が等しくなってプローブ電流は 0 となる。その後電子電流は急激に増加していく。その際, この図からも分かるように, ヒステリシスは現れていない。

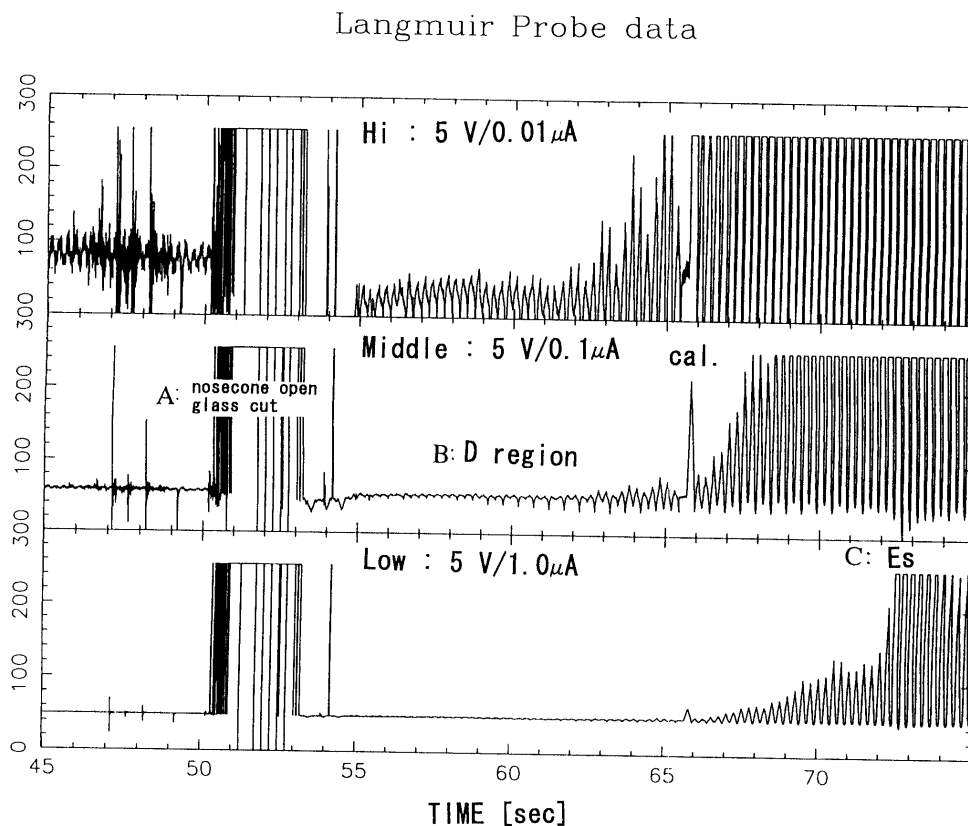


図2.7 実際に得られたデータ

横軸: 時間 [sec], 縦軸: プローブ電流 (デシマル値)。図中 A: ガラス割り, プローブ進展, B: 電離圏 D 領域通過, C: スポラディック E 層である。

図2.7の middle gain アンプによって得られた図からも分かるように、電圧0Vにおけるイオン電流は時々刻々とその値を変えており、図中C (Es層)において大きくなっているのが見られるが、それ以外の領域では一掃引ごとに増加、減少をくりかえしている。次章ではこれらのイオン電流の振るまいを含めた個々のプローブ特性の詳細な解析を行う。

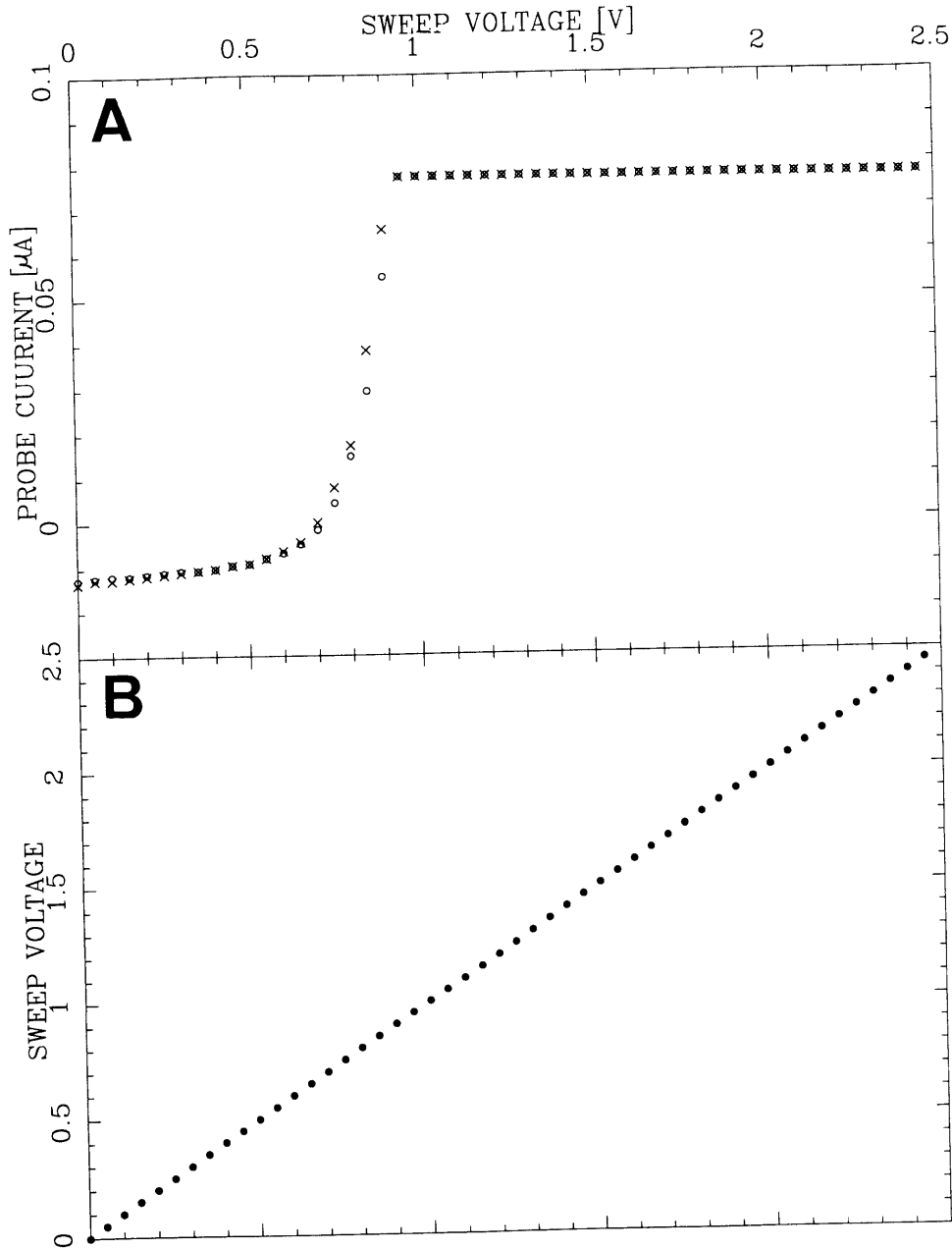


図2.8 実際に得られたラングミュア・カーブ
 (A) 横軸：印加電圧 [V]，縦軸：プローブ電流 [μ A]，
 (B) 横軸：時間 [msec]，縦軸：印加電圧 [V]
 ×印：印加電圧上昇時，○：同下降時，ヒステリシスは現れていない。

3. 解 析

本章ではラングミュア・プローブによって得られたデータから、プラズマ密度及び電子温度について、それぞれ解析する。

3.1 イオン電流からのプラズマ密度解析

3.1.1 太陽紫外光によるイオン電流への影響

先に述べたようにイオン電流値はイオン密度の振る舞いを表すため、この密度について解析するために、印加電圧が最小値の時のイオン飽和電流の高度分布を示す(図3.1)。

上昇時140 km以上、下降時165 km以上の領域は、プラズマ密度が高くイオン飽和電流値が大きいため low gain を、それ以下は middle gain を使用している。gain の違いによってデータのばらつきが異なるが、これは電流値の分解能が異なることによる (middle: $0.004 \mu\text{A}$, low: $0.04 \mu\text{A}$)。上昇時の高度92.5 km, 下降時の高度91.2 km 付近のプラズマ密度の高い領域が Es 層である(図3.1-Es)。イオン電流は細かな変動を繰り返す(0.25 sec. 毎), 更に約8秒周期で大きく変動している。まずこれらのイオン電流の振る舞いを理解することにする。

この約8秒の周期的な変化について解析するために、ロケットのスピンの軸上方から見た図を考える。図3.2は、図3.1-Aを取り出し、プロットしたものである。図のA~Hは、各プローブ方向でのイオン飽和電流値を中心からの距離としてプロットしたものである。上が北、右が東であり、図中の円は電流値 $0.02 \mu\text{A}$ に相当する。IはA~Hの8スピン(約8 sec.)のデータを重ねてプロットしたもの、Jはその間の高度分布である。I図からわかるように、スピン軸周りではイオン電流値の偏りが見られる。スピン周期が約1.04 Hz, 測定間隔が0.25 sec. であるので、図のA~Hからも分かるように1スピン毎に測定点が僅かずつずれ、8スピンでほぼもとの位置に戻ることで、高度分布における周期的な振る舞いはロケットスピンによる変調であると理解される。

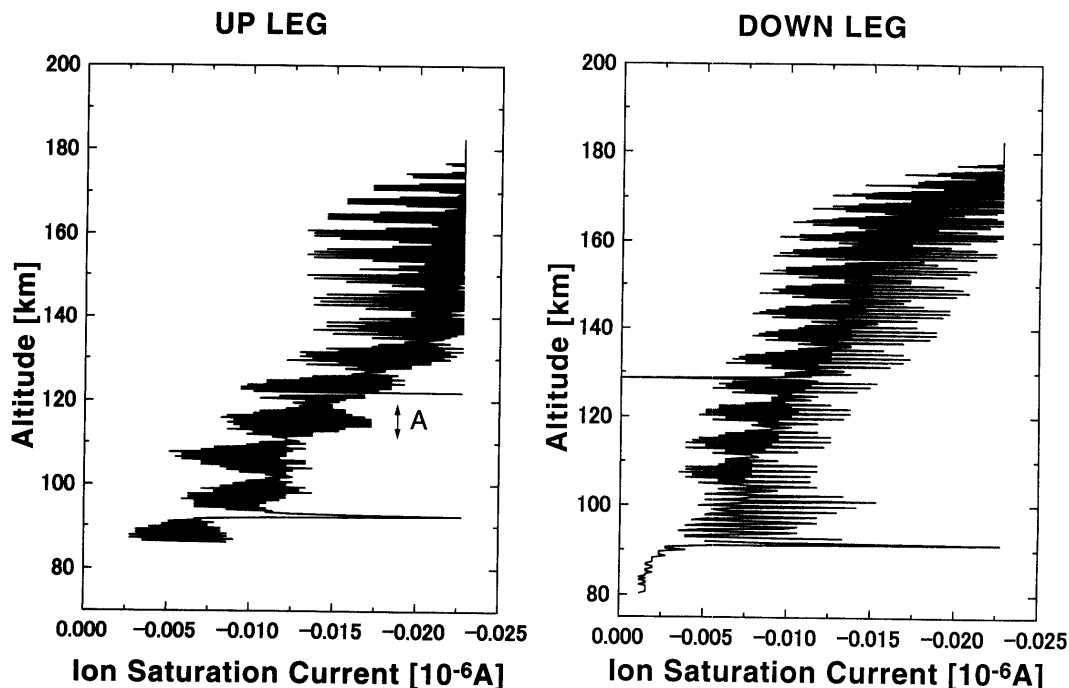


図3.1 イオン飽和電流値の高度分布

左: ロケット上昇時, 右: 同下降時. いずれも middle gain のデータを用いた.

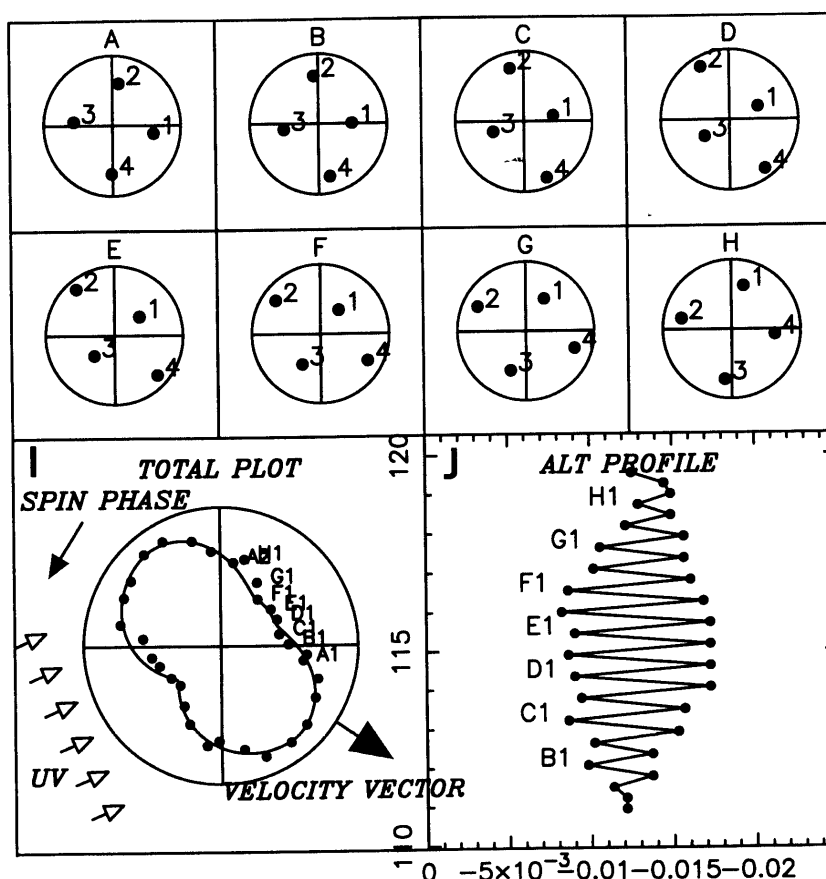


図 3.2 図 3.1 中 A の分析結果

A~I: ロケットスピンの軸上方から見たときの各プローブ方向でのイオン飽和電流値を、中心からの距離で表したもの。上が北、右が東。円周は $0.02 \mu\text{A}$ 。

A から順に H まで 1 スピン毎, I は A~H をまとめてプロットしたもの, J はその高度分布である。

次にこのプラズマ密度の偏りについて考える。この図は上昇時のデータであり、進行方向とスピンのなす角は $15 \sim 30^\circ$ ほどなので、ロケットの航跡による影響は無視できる。この時太陽からの紫外線が西南 $23^\circ 02'$ の方向から照射されていることを考えると、紫外線照射によってプローブ表面から 2 次電子が放出されることによる影響がデータに乗っていると考えられる。そこでこの 2 次電子の影響を取り除くために、以下のようにして解析を行った。

プローブはステンレスで出来ているため、これに紫外線が照射されることによってプローブ表面から 2 次電子が飛び出し、その結果としてイオン電流が増加したように見えると考えることができる。プローブに紫外線が垂直に照射される時にイオン電流は最大となるはずである。この効果を含めたイオン飽和電流を以下のように決める。

図 3.3 はスピンの軸上方から見たロケット図であり、反太陽方向を基準とし、そこからスピンの向きに角度 θ をとり、ロケット半径を r 、プローブ長を L とする。 $\pm s^\circ (=17.04^\circ)$ でプローブ全体がロケットの影に入る。

$$(A) -s^\circ < \theta < s^\circ$$

この時プローブ全体がロケットの陰に入り込むことになるため、ここでの電流値は太陽紫外線の影響を受けることなく一定と考えられる。よって、

$$I_s = I_0 \quad (3.1)$$

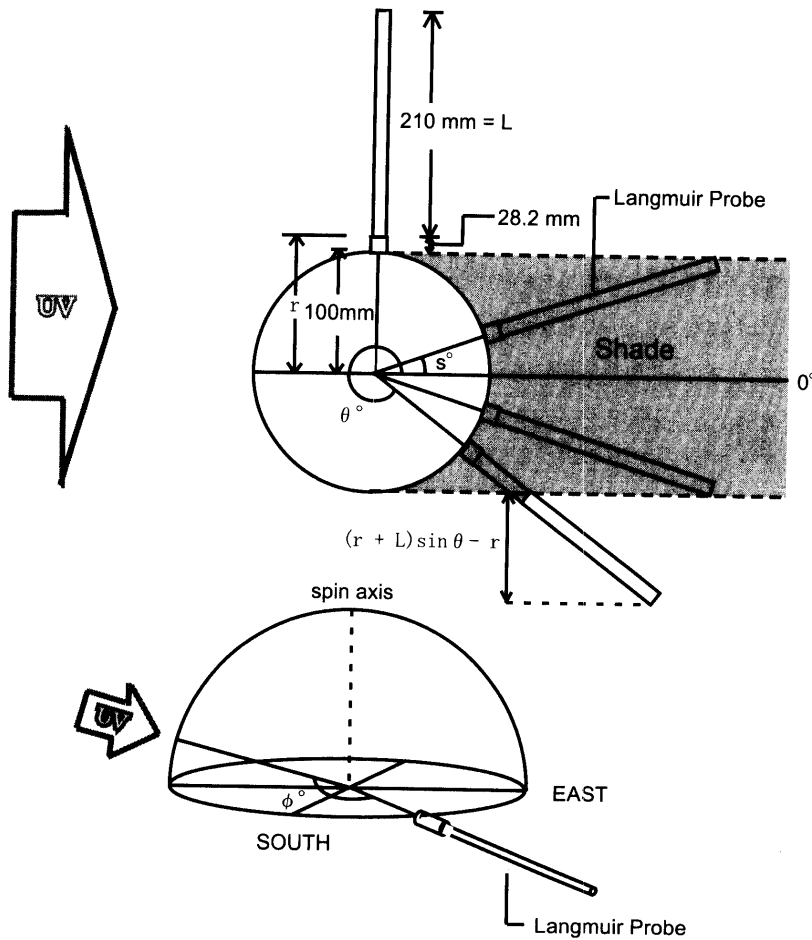


図 3.3 プローブ方向と太陽紫外線照射方向との関係

(B) $90^\circ < \theta < 270^\circ$

この領域ではプローブ全体に紫外線が照射されていると考えられる。太陽とプローブとのなす角を ϕ とすると、プローブから飛び出す2次電子の効果は $A \sin \phi$ である。更にこの領域ではロケット本体から出る2次電子を拾う効果を考える必要があり、それを $-B \cos \theta$ で表すと、ここでのイオン飽和電流は、

$$I_s = I_0 + A \sin \phi - B \cos \theta \tag{3.2}$$

となる。

(C) $s^\circ < |\theta| < 90^\circ$

この時はプローブの一部がロケットの陰に入り込み、紫外線照射面積が減少して行く効果を考慮すると、ここでのイオン飽和電流は、

$$I_s = I_0 + \frac{(r+L)\sin \phi - r}{L} A \sin \phi \tag{3.3}$$

となる。ここはUV方向に対してロケットの裏側にあたるため、ロケット本体からの2次電子の効果は考慮しない。

これらの式でフィッティングを行ったものが図3.2-I中に示された曲線である。この際 middle gain で得られたデータのみを使用した。

以上のようにして実際のデータから太陽紫外線の影響を差し引いたイオン飽和電流値を、イオン密度に換算す

る。イオン電流 I_i は、

$$I_i = en_i S V \quad (3.4)$$

(e : 電子電荷 ($1.602 \times 10^{-19} \text{C}$); n_i : イオン密度; S : プローブ表面積 ($0.3 \times 21 \text{ cm}^2$))

で表される。 V には通常イオンの熱速度を入れるが、ロケットがプラズマ中を移動する際、ロケット速度 (高度 1~1.5 km/sec.) は電子の平均熱速度 (高度 150 km で $2 \times 10^2 \text{ km/sec.}$) と比べ非常に小さいため電子電流にはほとんど影響を及ぼさない。しかしイオンの熱速度 (高度 150 km で約 700 m/sec.) よりは大きく、イオン電流値はイオンの熱運動ではなくロケット速度によるものと考えられるため、ここでは $V = V_R$ (ロケット速度) とした。この様にして算出されたイオン密度の高度プロファイルを図 3.4 に示す。図中には同ロケットに搭載されたインピーダンス・プローブによって得られた電子密度 n_e の高度プロファイル (渡辺勇三氏・宇宙研) も併せてプロットしてある。この際プラズマ全体としての電気的中性は保たれており、 $n_e = n_i$ とみなす。これによると、ラングミュア・プローブのイオン電流から得られた高度分布は、絶対値は異なるが、高度分布そのものの振る舞いとしてはインピーダンス・プローブによるものとよく合っているといえる。

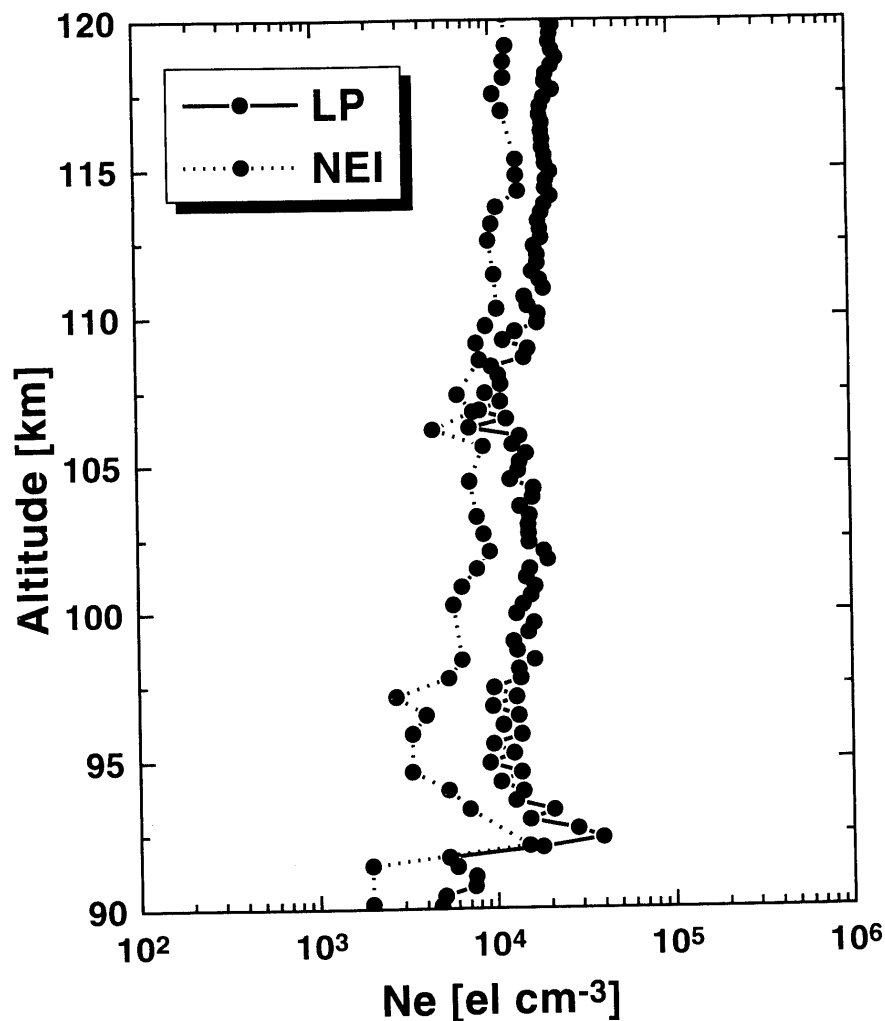


図 3.4 電子密度高度分布

LP: ラングミュア・プローブ, NEI: インピーダンス・プローブによって測定された電子密度 (ロケット上昇時).

3.2 電子温度解析

3.2.1 電子温度の算出及び決定

得られたラングミュア・カーブから電子温度を算出した。算出方法は以下の通りである。

- ラングミュア・カーブにおいて、印加電圧0~0.5 V (10点) でイオン飽和電流値を直線で近似し、プローブ電流値から差し引く。
- 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、最小二乗法により相関係数0.99以上となる4点で直線フィットする。
- 得られた直線の傾きから電子温度を算出する。

このようにして算出した電子温度の高度プロファイルを図3.5に示す。この際テレメータ送信器のビットレートが低くデータのばらつきが大きいため、5点ずつの移動平均をとり、平滑化した。高度110 km以上の領域で電子温度のゆれが大きいの、サンプリングを少なく取ったためである。ここで、太陽紫外線の影響を調べるた

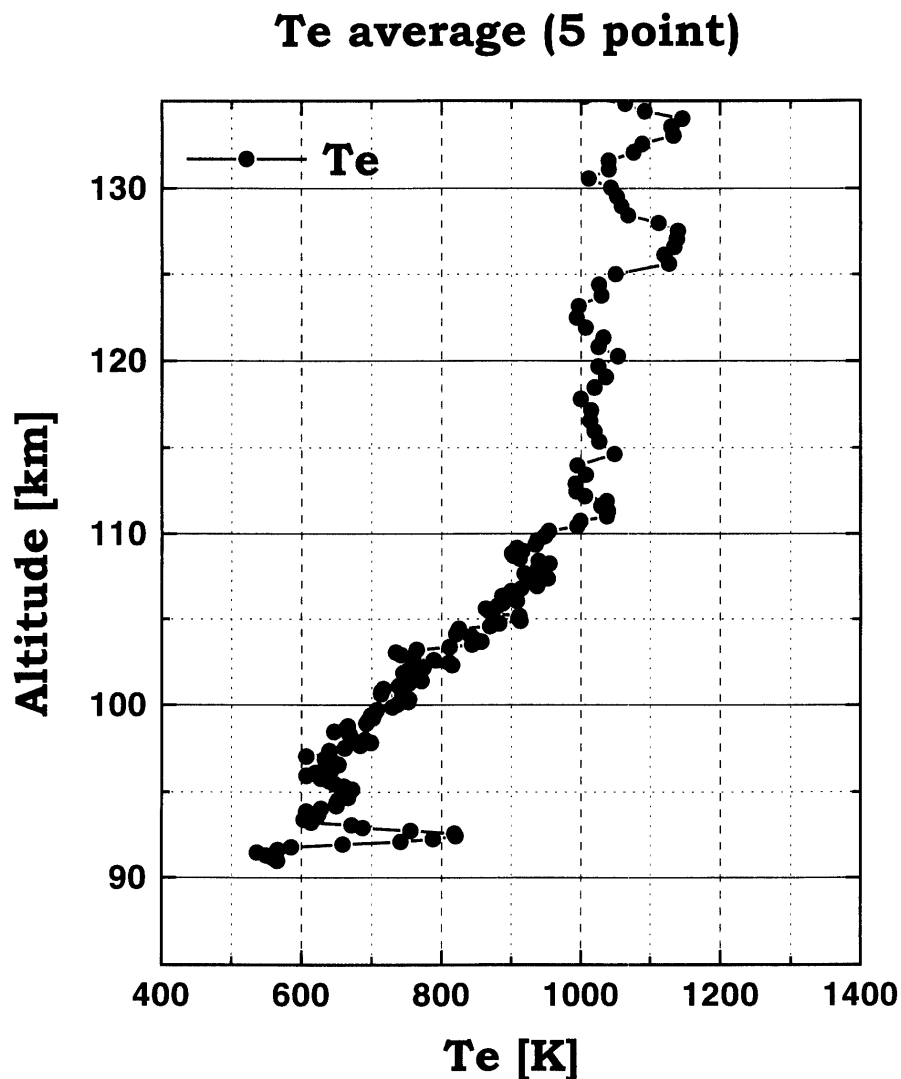


図3.5 電子温度高度分布 (5点ずつの移動平均)

110 km 以下は得られたデータを全てプロット, 110 km 以上は 500 m おきに 1 点ずつプロットした。

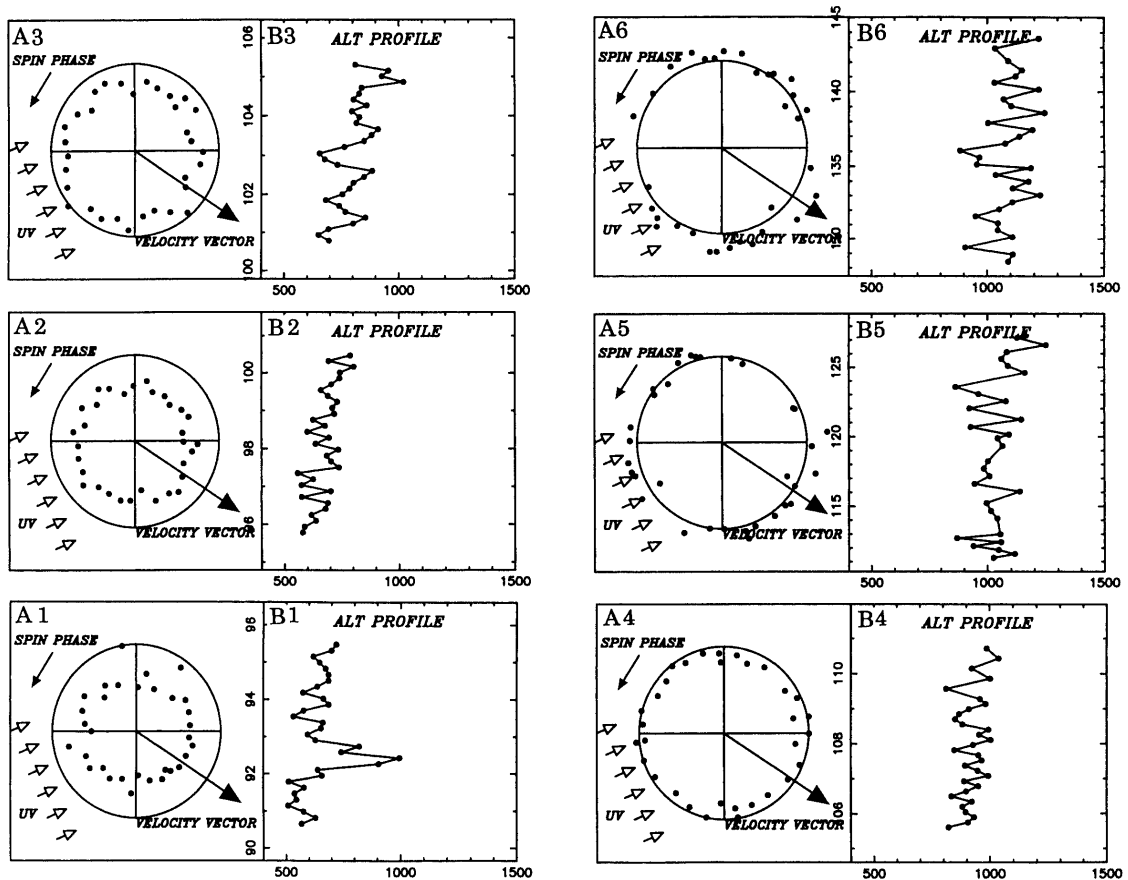


図 3.6 A: 各測定位置における電子温度と, B: その高度分布で, 高度の低い方から高い方へ順に 1~6 となっている。
A はロケットスピン軸上方から見たときの各プローブ方向での電子温度を中心からの距離としてプロットしたものを。

め, イオン電流解析と同様, スピン軸上方から見た図を用いる。図 3.6-A はラングミュア・プローブの位置における電子温度 (円周: 1000 K), B はその間の高度分布であり, 低高度から順に 1~6 となっている。これによると, 全体としてイオン飽和電流で見られたような明らかな変動は見られないが, A 3 及び B 3 (高度 100~106 km) を見ると 8 点毎に規則的な変動が現れている。電子温度の測定間隔が約 125 msec., スピン周期が約 1.04 sec. であることから, これは 1 スピン毎の変化である。高温部分 (B 1, D 1, E 4, G 1) は A 図中第 3 象限にあり, 低温部分 (A 2, B 4, D 4) は第 1 象限にあるということはつまり, UV が照射されている領域で高温, UV に対しロケットの裏側にあたる領域で低温になっているということである。このことの定性的な解釈として, ロケット本体からの 2 次電子が周辺の電子を加熱している可能性がある。これが他の高度で現れない理由であるが, まず 100 km 以下の領域においては大気ของความが増すことによる UV 照射量の減衰及び中性大気との熱的緩和が考えられる。電子-中性大気間の衝突周波数は 100 km 以下の領域では 10^5 sec^{-1} から高くなっていく。このためロケット本体付近で 2 次電子による加熱を受けた電子ガスと中性大気粒子との間で即座にエネルギー緩和が行われ, 結果としてその影響はラングミュア・プローブのデータには現れないということが考えられる。これ以上の領域でこの影響が現れないのは, 2 次電子のエネルギーが高いためであると思われる。ロケットの飛翔高度が上昇するにつれ大気密度が減少すると共に UV による 2 次電子のエネルギーは高くなり, そのエネルギーが緩和されることなくプローブ表面に到達するものもあるが, ラングミュア・プローブで検出されるのは低エネルギーの粒子であり, 結果としてその影響はデータに現れないということになる。

3.2.2 Es層付近のラングミュア・カーブの変化

ここでは高度92 km付近に発生したEs層内での電子温度について議論する。Es層内では電子密度が高いため、middle gainでのイオンの飽和電流領域で出力電圧の限界を超えており、前述の方法では正しい電子温度が算出されない。高度90~100 kmの領域を取り出したものが図3.7である。図中D, Eの2点で得られたラングミュア・カーブがEs層ピーク付近の温度を与える。しかし前述の電子温度算出方法でイオン電流をフィットさせるとイオン電流直線は観測値から大ききずれ、不正確な温度を算出してしまう(図3.8)。ここで、図3.7に示したEs層中心付近の2点(D, E)について、

- 図中A~Iについて、イオン飽和電流ではなく、より空間電位に近いと思われる印加電圧0.5 Vにおけるイオン電流を算出し、そこでの密度勾配を考える。
- ここで、BとC, DとE, FとG, HとIはそれぞれ一つの印加電圧掃引の下降時と上昇時である。
- 密度勾配領域における電子温度を算出する。算出方法は前述の通りである。
- D, Eに関してはいくつかのイオン電流直線でフィットし、それぞれについて温度を算出して比較する。直

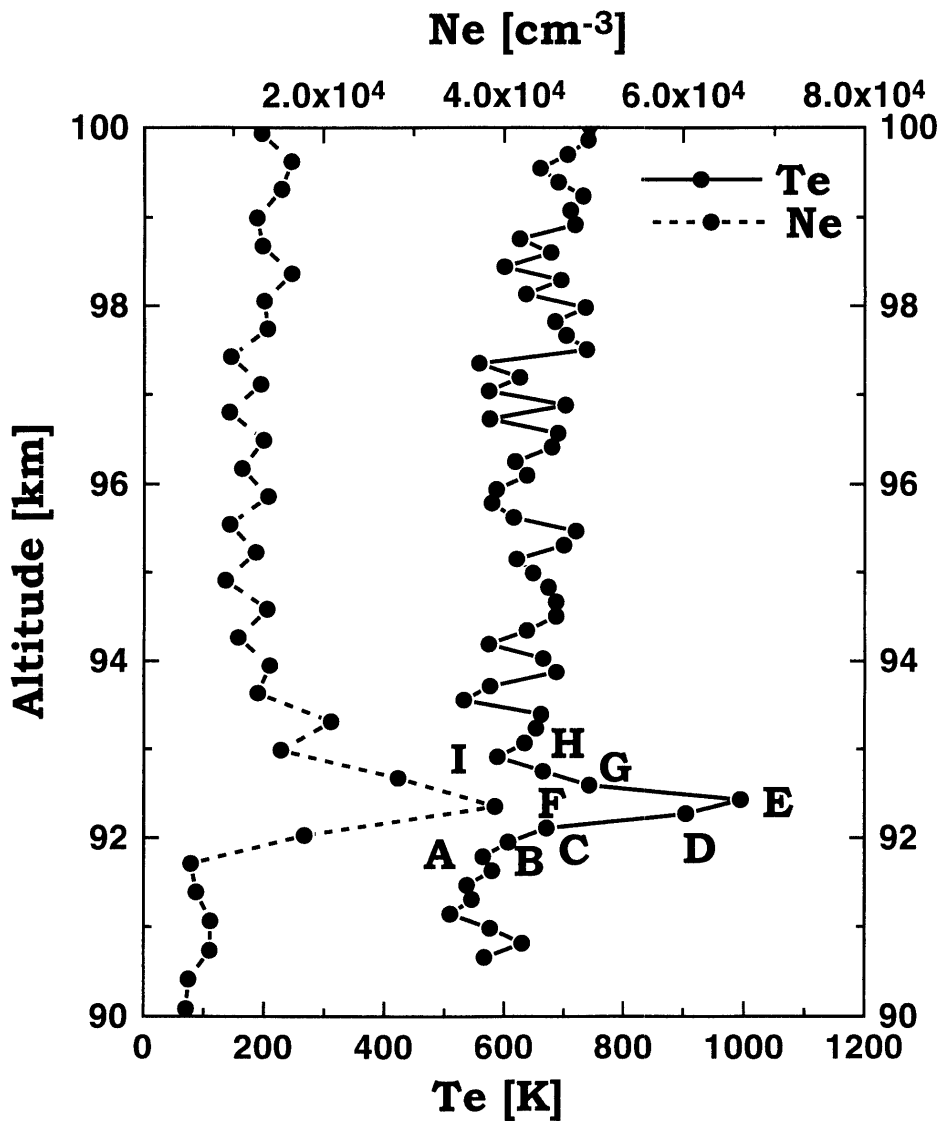


図 3.7 Es層付近での電子温度高度分布 (図中点線は電子密度)

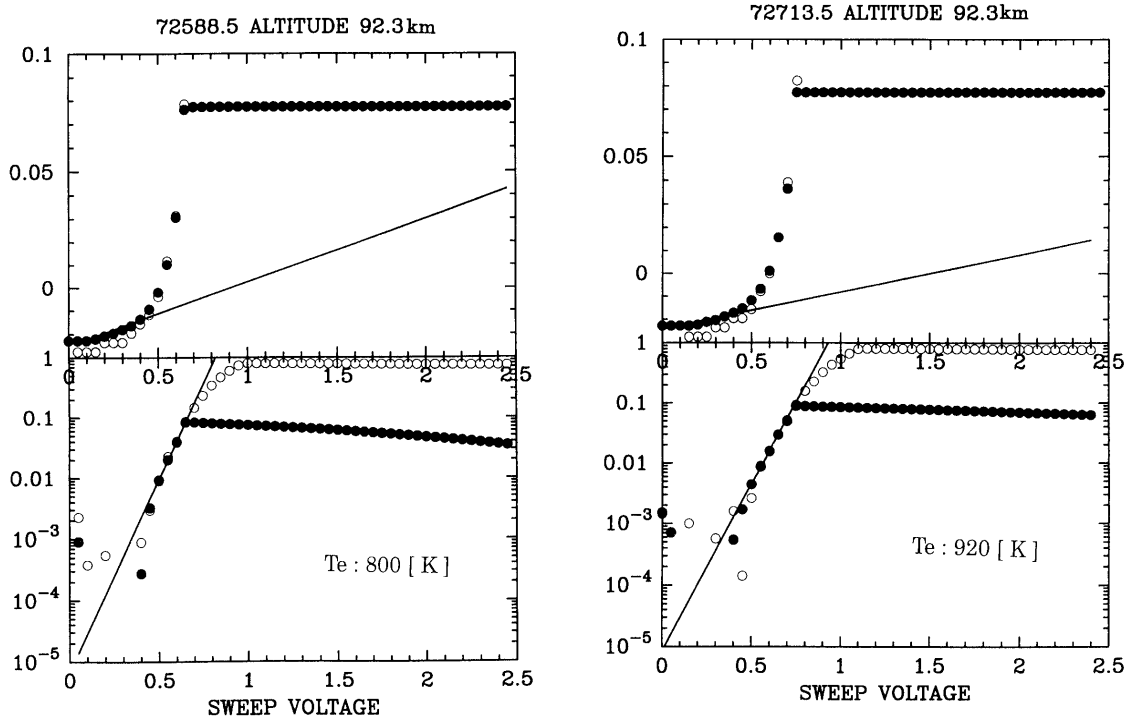


図3.8 図3.7中(左)D, (右)Eの(上)ラングミュア・カーブ, (下)電子電流の対数プロット, イオン飽和電流直線(0~0.45 V)は実際の値から大きくずれている.

線はそれぞれ0~0.15 V, 0.05~0.2 V, 0.1~0.25 V, 0.15~0.3 V, 0.2~0.35 Vの5通りでフィットする.

このようにして解析を行った(図3.9~3.13). それぞれの特徴を以下に示す.

○(D)(E)

この付近で密度の最大を迎える. そこで, ここではいくつかのイオン飽和電流直線をフィットし, それぞれについて温度を算出してみることにした. イオン飽和電流の直線を前述の5通りでフィットし, その結果を以下に示す.

●(1)0~0.15 V 図3.9

この場合, イオン飽和電流直線の傾きはもっとも緩やかで, これをイオン電流として差し引いた後の電子電流値の対数プロットは, (D) V_p : 0.2~0.4 V, (E) V_p : 0.1~0.4 V 付近で直線から大きく外れる領域を持つ.

●(2)0.05~0.2 V 図3.10, 3.11, 3.12

この3つの対数プロットはいずれもよく直線に乗っており, 電子温度はそれぞれ800 K以上を示している.

●(3)0.2~0.4 V 図3.13

ここでのイオン電流直線はかなり急な傾きを持ち, それに伴い電子電流対数プロットの直線部分の傾きも急になり, 電子温度は低く算出される. この場合, 電子温度は5つのフィットの中でもっとも低い値となっているが, それでもEs層上下の値よりは上昇している.

以上の結果から, Es層の上端及び下端での電子温度は500~600数Kであるのに対し, Es層ピークに向かって電子温度は上昇し, もっとも低く見積もった場合でもピークにおいて800 Kを超えていることがわかった. なお, 電子密度の勾配領域においてはマクスウェル分布からのずれは見られず, 算出された電子温度は妥当であると考えられる.

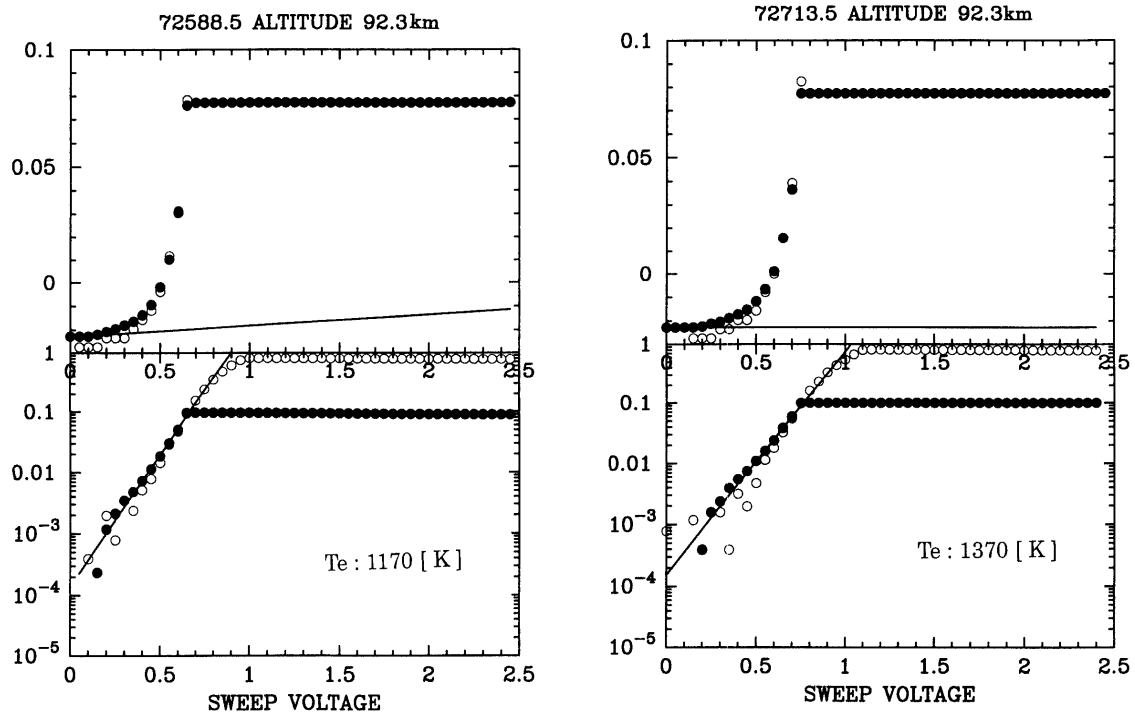


図3.9 図3.7中(左)D, (右)Eの(上)ラングミュア・カーブ, (下)電子電流の対数プロット. イオン飽和電流は0~0.15 Vでフィッティングさせている. 電子電流の対数プロットは低電圧部で直線からのずれがみられる.

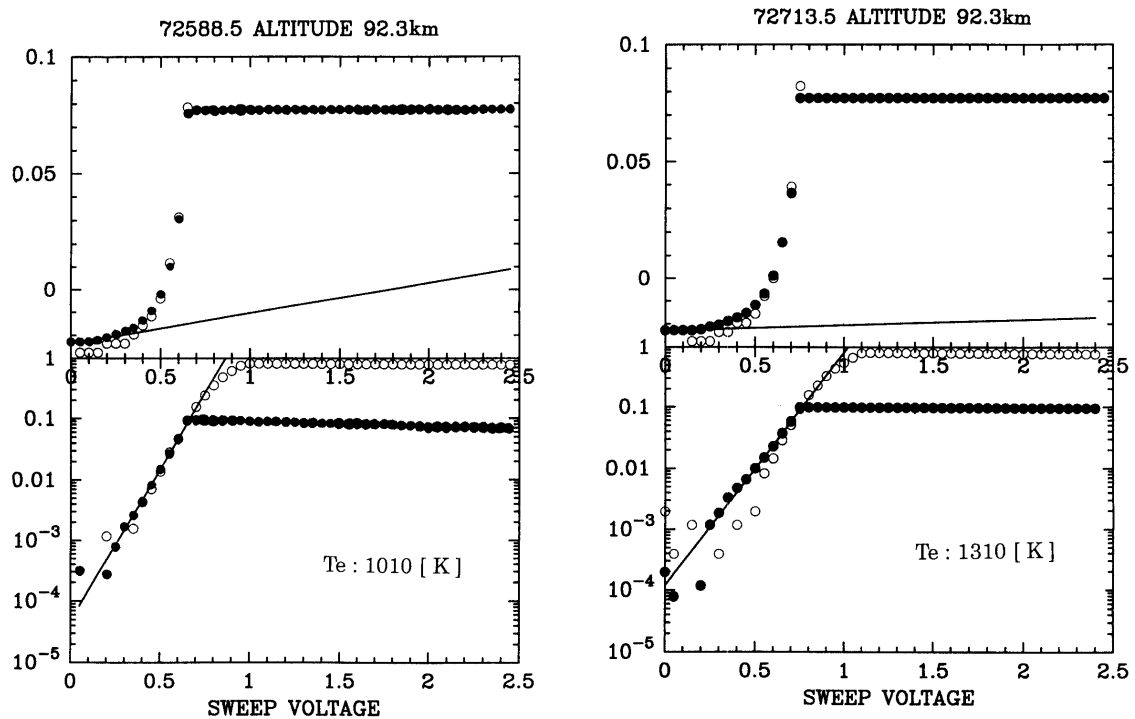


図3.10 図3.7中(左)D, (右)Eの(上)ラングミュア・カーブ, (下)電子電流の対数プロット. イオン飽和電流は0.05~0.2 Vでフィッティングさせている. 電子電流の対数プロットは直線によく乗っている.

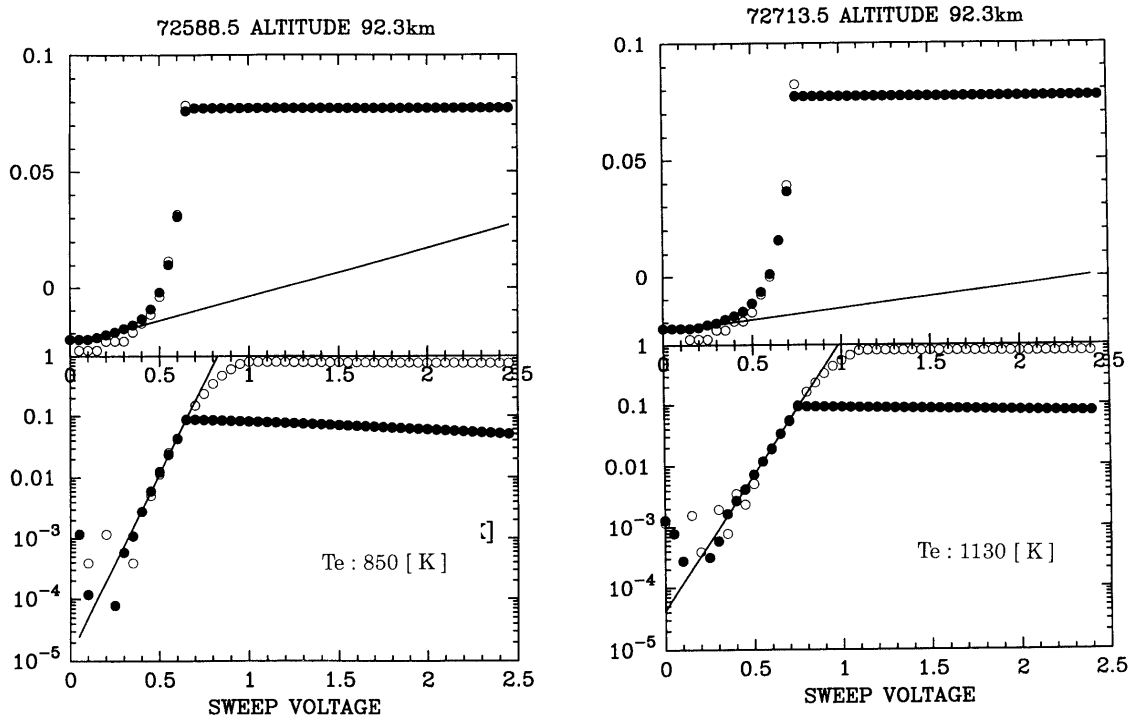


図 3.11 図 3.7 中(左)D, (右)E の(上)ラングミュア・カーブ, (下)電子電流の対数プロット. イオン飽和電流は 0.1~0.25 V でフィッティングさせている. 電子電流の対数プロットは直線によく乗っている.

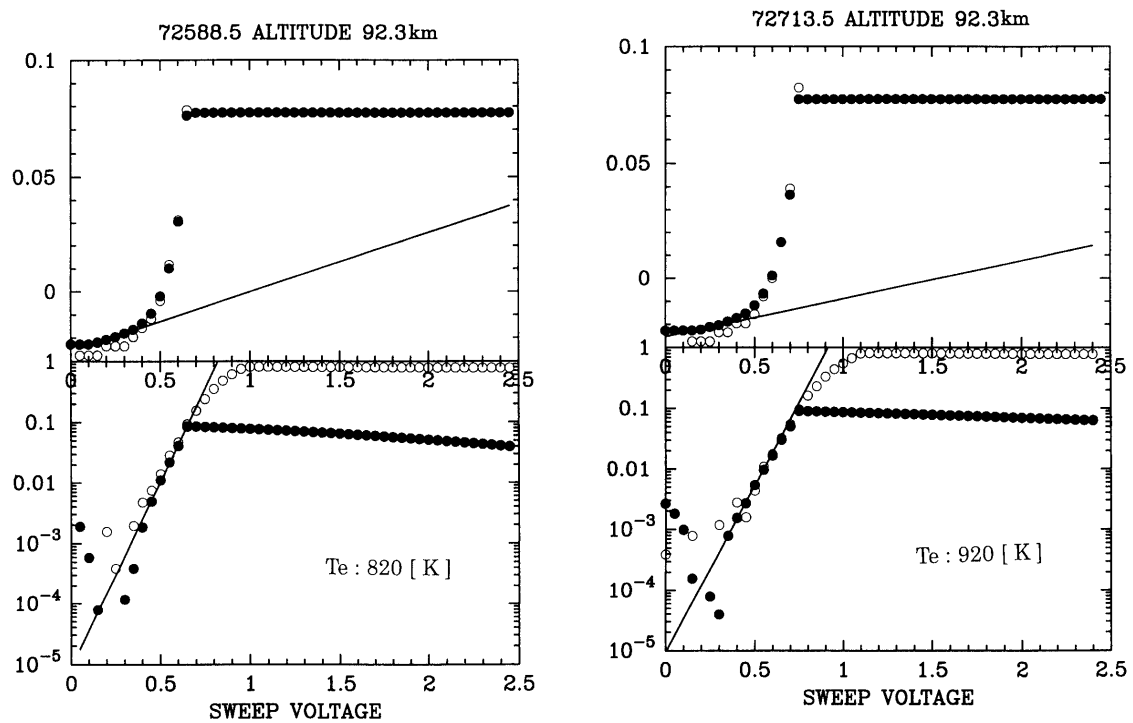


図 3.12 図 3.7 中(左)D, (右)E の(上)ラングミュア・カーブ, (下)電子電流の対数プロット. イオン飽和電流は 0.15~0.3 V でフィッティングさせている. 電子電流の対数プロットは低電圧部で直線からのずれがみられる.

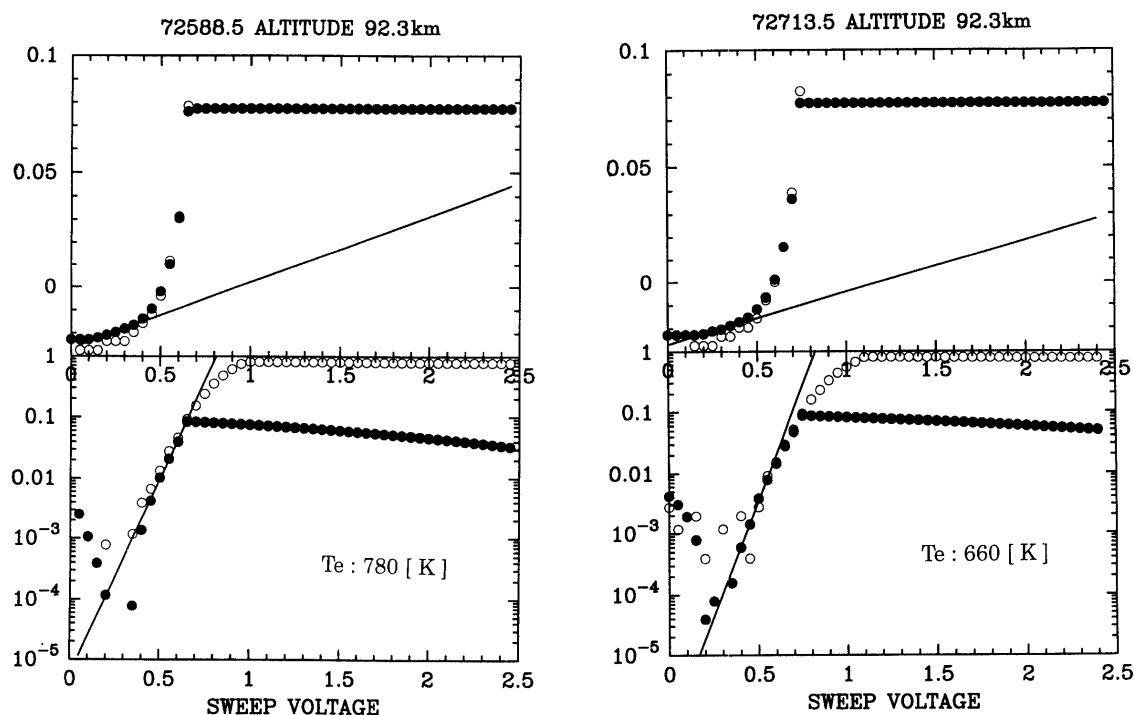


図 3.13 図 3.7 中(左)D, (右)E の(上)ラングミュア・カーブ, (下)電子電流の対数プロット. イオン飽和電流は 0.2~0.35 V でフィッティングさせている. 電子電流の対数プロットは低電圧部で直線からのずれがみられる.

4. 考察とまとめ

これまでの解析結果をもとに, プラズマ密度及び電子温度についてそれぞれ考察し, 以下のようにまとめた.

4.1 プラズマ密度の考察

4.1.1 インピーダンス・プローブとの比較

図 3.4 からわかるように, ラングミュア・プローブから算出した密度は, インピーダンス・プローブで得られたものと定性的にはよく合っているが, 絶対値には約 2 倍ほどの違いがみられる. これはラングミュア・プローブまわりのイオン・シースの影響であると思われる. ラングミュア・プローブによるイオン密度評価は印加電圧最小値の時のイオン飽和電流値を採用しており, この辺りではプローブ付近のイオン・シースが広がり, プローブの実行的な表面積が大きくなってイオン電流は増大し, 実際のプラズマ密度より高い値として算出される. 実際には空間電位におけるイオン電流値で換算しなければならないが, このイオン電流は空間電位以下で直線で近似されるので, その変動について考察するには十分であるといえる.

また, 下降時高度 105 km 以下の領域でのラングミュア・プローブでの高度分布には, イオン密度が高くなる領域が現れているが, これは衝撃波の影響と考えられる. 飛翔体が大気中を超音速で運動しているとき, 飛翔体の前面では大気が圧縮され高密度に (Ram 効果), 逆に後面では低密度になり (Wake 効果), マッハ数 ($M = V/v_s$, V : 飛翔体速度, v_s : 音速度) が大きくなるにつれ, 前面での密度は高くなる. この影響はロケットの形にもよるが, $M=4$ の場合, 密度は 4~5 倍となる (Bird, 1988). ロケットの全飛翔行程において中性大気密度はプラズマ密度に比べて 4~8 桁ほど高く, この効果は主に中性大気によるものである. 下降時 105 km 以下の領域を拡大すると図 4.1-B のようになり, スピン軸上方からみたものが図 4.1-A で, 進行方向側で密度が高く, 後ろ側で低いことがわかる. この効果は下降時においてはほぼ全行程で見られるが, とくに 100 km 以下で

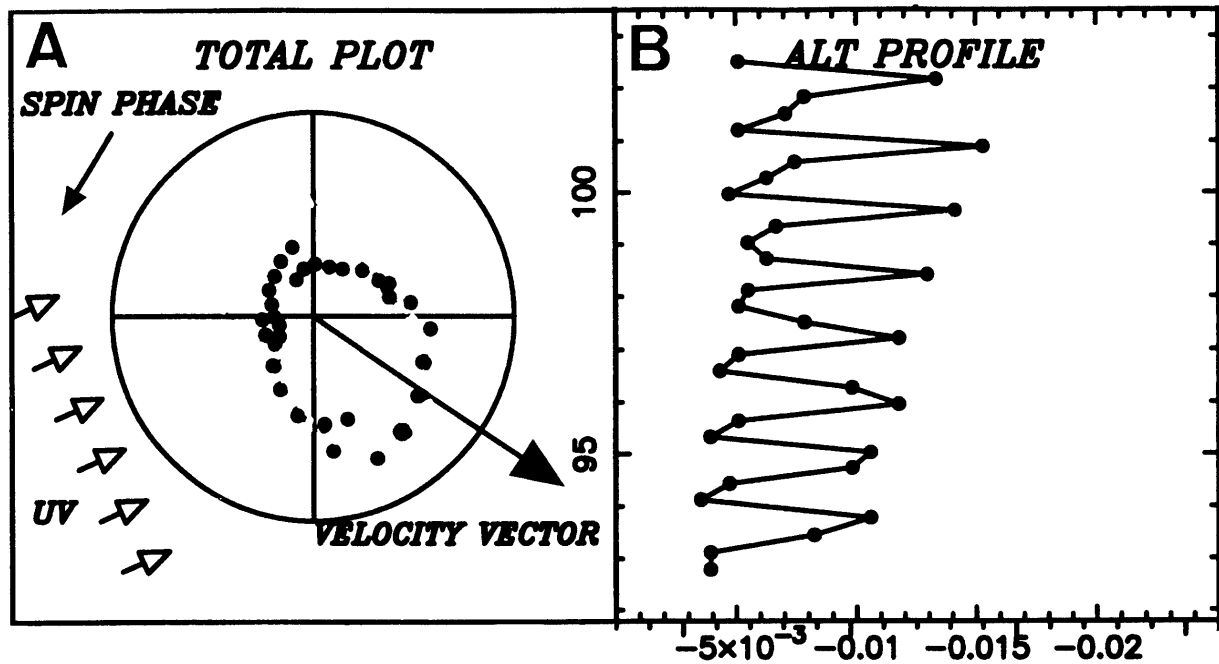


図 4.1 ロケット下降時の、A：各プローブ方向での電子密度（円周： $0.02 \mu\text{A}$ ），B：高度分布．進行方向と逆側でプローブはロケット航跡内に入り、電子密度は低くなっている。

顕著に現れているのは、このあたりでの中性大気の平均自由行程（40 cm）とロケットの大きさ（頭胴部直径 31 cm，モータ分離後のロケット長 200 cm）がほぼ同程度になるためである。この高度付近の中性大気-イオンの衝突頻度は $\sim 10^3 \text{ sec}^{-1}$ 以上で、中性大気の圧縮の影響がイオンにも現れるということは十分に考えられる。上昇時にこの効果が現れないのはロケットの姿勢から衝撃波が出来にくいためである。インピーダンス・プローブにこの影響が現れないのはプローブの長さの違いによるものであり、それぞれの全長はラングミュア・プローブが 20 cm，インピーダンス・プローブが 1 m で、ラングミュア・プローブが下降時全て衝撃波内に入る可能性があったのに対し、インピーダンス・プローブは一部が衝撃波外に出ていたと考えられる。

4.1.2 密度の高度分布に見られる鉛直波状構造

図 4.2 に、上昇時における密度の高度分布を示す。プラズマ密度の高度分布には、矢印で示されているような波長 10 km 程度の鉛直波状構造が見られる。これは Es の形成にあたって何らかの大气波動が関係していることを物語っている。これと同様の構造が、1996 年 8 月に実施された SEEK キャンペーン（Sporadic E Experiment over Kyushu Campaign）における電子密度高度分布にも現れている（図 4.3, Yamamoto *et al.*, 1998）。このキャンペーンでは地上からの電波による波動観測と共にロケットから TMA（Trimethyl Aluminum）を散布し、その動向を追うことにより中性風の観測も行っており、その結果から大气波動に伴う風の shear が確認されている。今回の観測では中性風の直接観測は行っておらず、山川で観測された MF レーダによる中性風のデータ（図 4.4）からは強い shear は見られなかったが、プラズマ密度に波状構造が現れていることから、大气波動の伝播に伴って中性風の鉛直 shear ができ、Es 層が形成されるという wind shear 理論にかなっていると考えられる。本ロケット実験で得られた電子密度の高度分布を、大气波動の効果を考慮して包括的に検討する事は、今後の課題である。

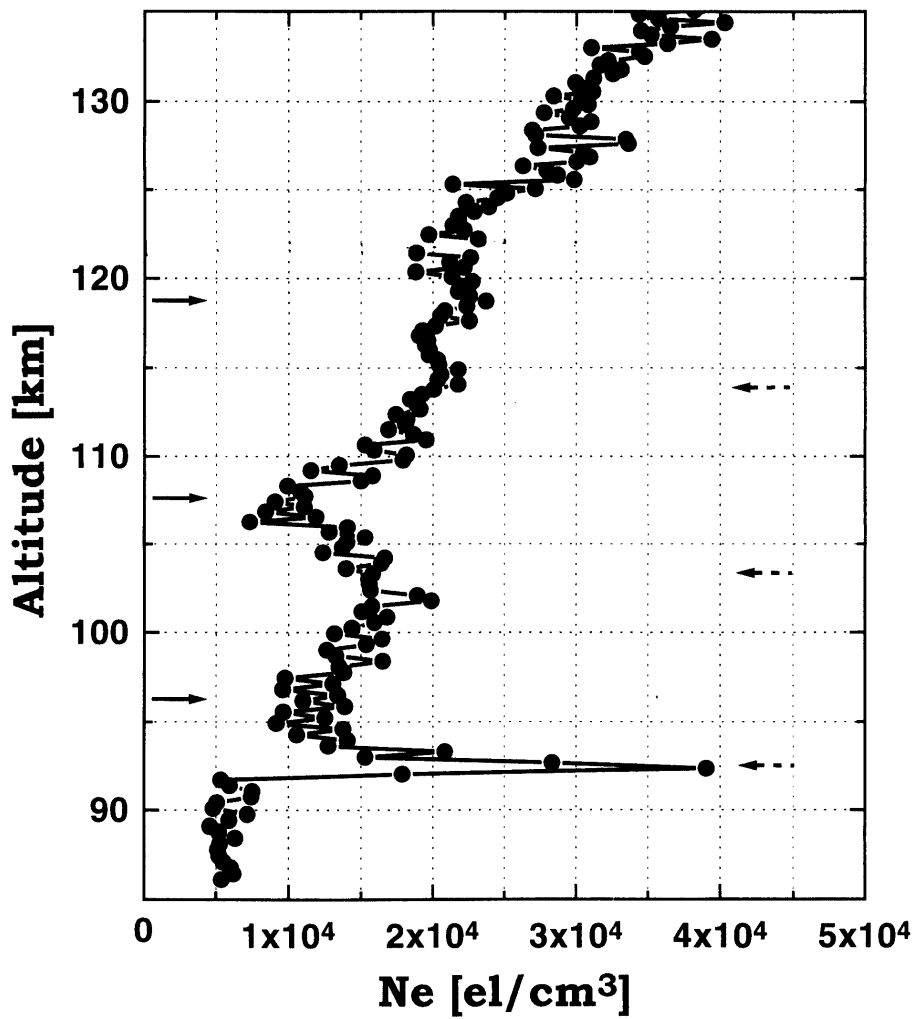


図 4.2 電子密度高度分布. 矢印で示されているような波状構造が見られる.

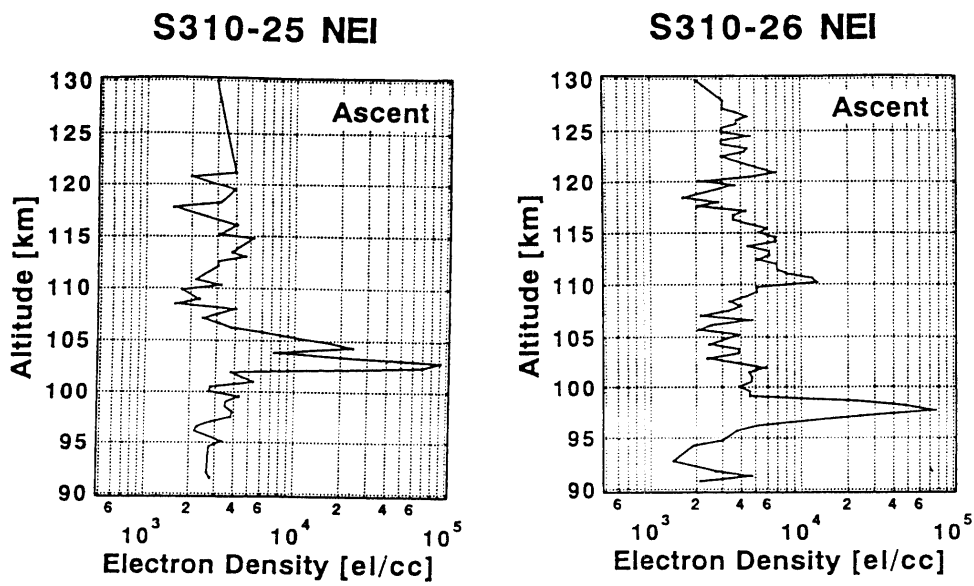


図 4.3 SEEK Campaign (Sporaide E Experiment over Kyushu) で得られた電子密度の高度分布 (Yamamoto *et al.*, 1998)

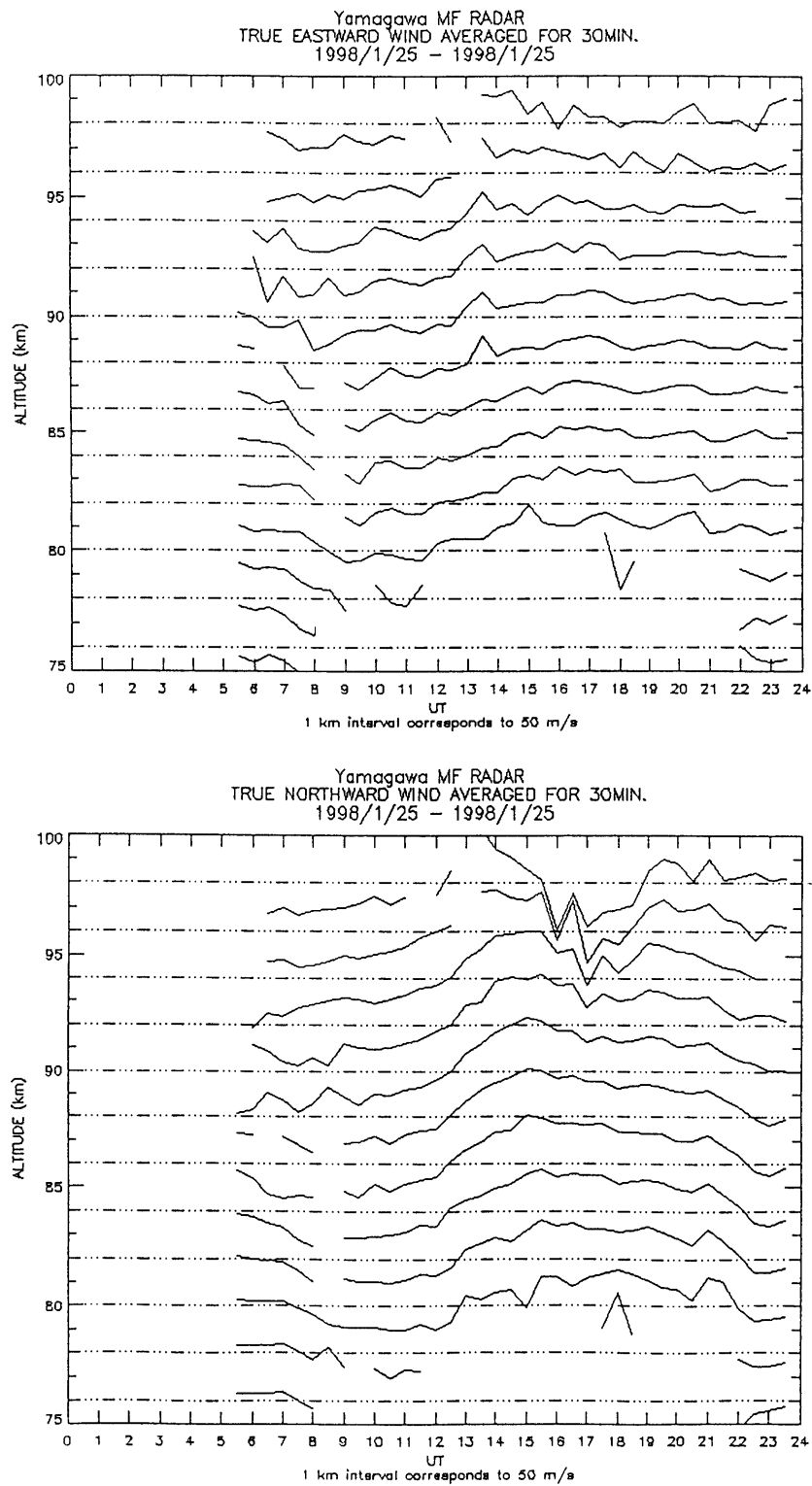


図 4.4 山川電波観測所 (130°6'E, 32°2'N) で得られた MF レーダによる中性風観測結果

4.2 電子温度の考察

4.2.1 Es 内での電子温度

前章で行ったラングミュア・カーブの解析から、図 3.9~3.13 の 5 つのカーブから算出された電子温度のうち、どの値がもっともらしいかを考える。表 4.1 には図 3.7 中の A~I の 9 点の電子温度を算出したラングミュア・カーブにおいて、印加電圧 0.5 V での電流値から換算したイオン密度が示されている。空間電位は 0.5 V より高いはずで、ここで得られた密度は実際のものよりは高いと考えられるが、振る舞いとしてはほぼ正しいということは前節で述べた通りである。ここで、インピーダンス・プローブによる密度勾配を見ると、Es 層下端からピークにおいて $n_{ep}/n_{e0} \approx 7$ (n_{e0} : Es 層外での電子密度, n_{ep} : Es 層ピークでの電子密度), ピークから上端にかけて $n_{ep}/n_{e0} \approx 5$ と、かなり急な勾配になっていることがわかる。従って D, E とともに (4)(5) は下端及び上端の密度と比べ 2 倍程度にしかならず、また図 3.12, 3.13 では、電子電流は低電圧付近で低い値として直線から外れており、これはイオン電流を高く見積もりすぎていることを物語っている。密度の観点からすると (1) がもっともらしいが、この場合も図 3.9 からやはり電子電流が低電圧付近で直線より高い値で外れており、これはイオン電流を低く見積もっているためと言える。残る (2)(3) は密度もほぼ同程度で、どちらもよく直線に乗っているが、より相関係数の大きいものとして、(2) での値がもっともらしい温度と結論付けられる。この値を採用すると、Es 層内ではその前後に対し、400~500 K 程上昇しているということが言える。以上の考察から得られた Es 層付近の電子温度の高度分布が図 3.7 である。

表 4.1 Es 層付近の電子温度データ解析

	I_i at 0.5 V [μ A]	Ne $\times 10^4$ [el/cm ³]	gradient	Te [K]
A	-0.0049	1.03	0.00314	560
B	-0.0071	1.48	0.00784	610
C	-0.0086	1.81	0.00471	780
D(1)	-0.0255	4.32	0.00471	1170
D(2)	-0.0171	3.59	0.01333	1010
D(3)	-0.0144	3.03	0.02118	850
D(4)	-0.0130	2.73	0.02588	820
D(5)	-0.0122	2.56	0.02902	780
E(1)	-0.0216	4.55	0.00235	1370
E(2)	-0.0184	3.87	0.01020	1310
E(3)	-0.0163	3.43	0.01647	1130
E(4)	-0.0144	3.03	0.02275	920
E(5)	-0.0134	2.82	0.02667	660
F	-0.0108	2.27	0.01098	710
G	-0.0101	2.13	0.01333	800
H	-0.0079	1.66	0.00102	590
I	-0.0095	2.00	0.00549	740

4.3 結 論

観測ロケット S-310-27 号機に搭載されたラングミュア・プローブによって得られたデータを詳細に解析することによって、次のような結論が得られた。

- イオン電流にみられる周期的な変動は基本的にはロケットのスピンによるものであるが、これに太陽紫外光によるプローブからの2次電子が影響している。
- 太陽紫外光によるプローブからの2次電子の電子温度への影響はなく、ロケット本体からの2次電子による電子の加熱がわずかに影響してくる。

以上のことを考慮して得られた地球物理学的結論は以下の2点である。

- ロケットが Es 層を通過することにより、過去観測例の少ない Es 層付近での電子温度測定に成功し、その結果 Es 層内での電子温度はバックグラウンドに対し 400~500 K の上昇を見せていることがわかった。
- 太陽紫外光の影響を差し引いて得られたプラズマ密度の高度分布には中規模の波状構造が見られた。これは Es 層の形成において大気波動に伴う wind shear があったことを示唆するものである。

4.4 おわりに

Es 層内での温度上昇におけるメカニズムに関しては未だ明らかではない。序論で述べたような Hooke (1969) 及び Szuszczewicz and Holmes (1974) らの理論では、この温度上昇は説明できない。これだけの温度上昇を引き起こす要因として電場によるジュール加熱もしくはプラズマ不安定に起因する過熱等が考えられるが、SEEK キャンペーンの際に行われた電場観測では、Es 層の上下の低密度領域で高電場が観測されており、Es 層内ではそれほど大きな電場はないという結果が得られている (Pfaff *et al.*, 1998)。また、Es 層内はプラズマ密度が高いため層内での電気伝導度が大きく、ジュール加熱を引き起こすような定常電流が出来にくいとも考えられる。

また、今回の実験でもこれまでの観測に見られたように、電子温度はこれまで観測されている中性大気温度(高度 100 km 付近で 200 K)に対して数倍高い値として測定された。電子温度は、光電子による加熱と電子の中性大気及びイオンとの衝突による冷却、中性分子(主に N₂)の振動エネルギーの転化等、大気の微視的熱収支を考えなければならず、その加熱、冷却源としてそれぞれの温度及び密度を同時に測定する必要がある。Es 層内での熱収支を議論するには、最低限磁場と電場を合わせて測定する必要がある。

謝 辞

宇宙科学研究所小山孝一郎教授をはじめ、本ロケット実験の遂行に御協力頂いた所内各位および所外各機関の関係者の皆様に謝意を表す。また、データ解析にあたり、インピーダンス・プローブデータを提供して下さった宇宙科学研究所の渡辺勇三氏、ロケット姿勢データを提供して下さった東海大学の高橋隆男教授、イオノグラム及び MF レーダによるデータを提供して下さった通信総合研究所の五十嵐喜良氏、有益な議論に惜しまず時間を費やして戴いた宇宙科学研究所太陽系プラズマ研究系の諸氏に謝意を表す。また、ラングミュア・プローブ測定器は(株)エーディの製作による。

参 考 文 献

- [1] Abe, T., K. I. Oyama, S. Watanabe and H. Fukunishi: Characteristic features of electron temperature and density variations in field-aligned current regions, *J. Geophys. Res.*, 98, 11257-11266, 1993.
- [2] Andreyeva, L. A., Burakov, Yu. B., Katasev, L. A., Komrakov, G. P., Nesterov, U. P., Urarov, D. B., Khryukin, V. G. and Chasovitin, Yu. K.: Rocket investigations of the ionosphere at mid-latitudes, *Space Res.*, 11, 1043-1050, 1971.
- [3] Appleton, E. V. and M. A. F. Farnett: On some direct evidence for downward atmospheric reflection of electric rays, *Roc. Roy. Soc.*, 109, 621-641, 1926.
- [4] Aubry, M., M. Blanc, R. Clauvel and C. Taieb: Some rocket results on sporadic E, *Radio Sci.*, 2, 170-177, 1966.

- [5] Bird, G. A. : Aerodynamic effects on atmospheric composition measurements from rocket vehicles in the thermosphere, *Planet. Space Sci.*, 36, 921-926, 1988.
- [6] Brace, L. H., H. C. Carlson and K. K. Mahajan : Radar backscatter and rocket probe measurements of electron temperature above Arecibo, *J. Geophys. Res.* 74, 1883-1885, 1969.
- [7] Breit, G. and M. Tuve : A test of the existence of the conducting layer, *Phys. Rev.*, 28, 554-573, 1976.
- [8] Carlson, H. C. and J. Sayers : Discrepancy in electron temperatures deduced from Langmuir probes and Incoherent Scatter Radars, *J. Geophys. Res.*, 75, 4883-4886, 1970.
- [9] Chapman, S. : The absorption and dissociative ionizing effect of monochromatic radiation in an atmosphere on a rotating earth, *Proc. Roy. Soc.*, 43, 26-45, 1931.
- [10] Dalgarno, A. : Inelastic collisions at low energies, *Can. J. Chem.*, 47, 1723-1729, 1969.
- [11] Fukao, S., M. Yamamoto, R. T. Tsunoda, H. Hayakawa and T. Mukai : The SEEK (Sporadic-E Experiment over Kyushu) Campaign, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 1761-1764, 1998.
- [12] Holmes, J. C. and E. P. Szuszczewicz : Versatile plasma probe, *Rev. Sci. Instrum.*, 46, 592-598, 1975.
- [13] Hooke, W. H. : Electron, ion and neutral-gas temperatures in temperate latitude sporadic-E layers, *Planet. Space Sci.*, 17, 737-748, 1969.
- [14] Kanal, M. : Theory of current collection of moving cylindrical probes, *J. Appl. Phys.*, 35, 1697-1703, 1964.
- [15] Layzer, D. : Theory of midlatitude sporadic E, *Radio Sci.*, 7, 385-395, 1972.
- [16] Mathews, J. D. : Sporadic E : current views and recent progress, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 60, 413-435, 1988.
- [17] Mori, H. and K. I. Oyama : Sounding rocket observation of sporadic-E layer electron-density irregularities, *Geophys. Res. Lett.* 25, 1785-1788, 1998.
- [18] Mott-Smith, H. M. and I. Langmuir : The theory of collectors in gaseous discharges, *Phys. Rev.*, 28, 727-763, 1926.
- [19] Oya, H. : Ionosphere plasma disturbances due to a moving vehicle, *Planet. Space Sci.*, 18, 793-802, 1970.
- [20] Oyama, K. I. and K. Hirao, Application of a glass-sealed Langmuir probe to ionosphere, *Rev. Sci. Instrum.*, 47, 101-107, 1976.
- [21] Oyama, K. I. and K. Hirao, P. M. Banks and P. R. Williamson : Is T_e equal to T_n at the heights of 100 to 120 km? *Planet. Space Sci.*, 28, 1980.
- [22] Oyama, K. I., K. Hirao, P. M. Banks and P. R. Williamson : Nonthermal components of low energy electrons in the ionospheric E and F region, *J. Geomag. Geoelectr.*, 35, 185-200, 1983.
- [23] Oyama, K. I. and K. Hirao : Energy gain of supra-thermal electrons from the excited neutral gases, *J. Geomag. Geoelectr.*, 37, 913-926, 1985.
- [24] Paniccia, F., C. Gorce, J. Bretagne and M. Capitelli, Electron energy distribution functions in molecular nitrogen, The role of super elastic electronic collisions in discharge and postdischarge electrons, *J. Appl. Phys.*, 59, 4004-4006, 1986.
- [25] Pfaff, R., M. Yamamoto, P. Marionni, H. Mori and S. Fukao : Electric field measurements above and within a sporadic-E layer, *Geophys. Res. Lett.* 25, 1769-1772, 1998.
- [26] Prakash, S., B. H. Subbaraya and S. P. Gupta : A Study of equatorial E region during evening twilight using a Langmuir probe, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 30, 1193-1202, 1968.
- [27] Sagalyn, R. C. and R. H. Wand : daytime rocket and Thomson scatter studies of the lower ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 76, 3783-3799, 1971.
- [28] Schutz, S. R. and L. G. Smith : Electron temperature measurements in mid-latitude sporadic E layers, *J. Geophys. Res.*, 81, 3214-3220, 1976.
- [29] Schutz, S. R., L. G. Smith and H. D. Voss : Electron heating rates in the E and Lower F regions, *Radio Sci.*, 10, 289-295, 1975.
- [30] Smith, L. G., L. H. Weeks and P. J. McKinnon : Rocket observations of electron temperature in the E-region, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 30, 1301-1312, 1968.
- [31] Smith, L. G. A sequence of rocket observations of night-time sporadic-E, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 32, 1247-1257, 1970.
- [32] Szuszczewicz, E. P. and J. C. Holmes : Surface contamination of active electrodes in plasmas : Distortion of conventional Langmuir probe measurements, *J. Appl. Phys.*, 46, 5134-5139, 1975.

- [33] Szuszczewucz, E. P. and J. C. Holmes, Observation of electron temperature gradients in mid-latitude Es layers, *J. Geophys. Res.*, 82, 1977.
- [34] Walker, J. C. G. : Electron and nitrogen vibrational temperature in the E-region of the ionosphere, *Planet. Space Sci.*, 16, 321-327, 1968.
- [35] Whitehead, J. D. : Recent work on midlatitude and equatorial sporadic-E, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 51, 401-424, 1988.
- [36] Yamamoto, M., T. Itsuki, T. Kishimoto, R. T. Tsunoda, R. F. Pfaff, and S. Fukao : Comparison of E-region electric fields observed with a sounding rocket and a Doppler radar in the SEEK campaign, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 1773-1776, 1998.
- [37] Yamamoto, M., T. Ono, H. Oya, R. T. Tsunoda, M. A. Larsen, S. Fukao and M. Yamamoto : Structures in sporadic E observed with an impedance probe during the SEEK campaign : comparison with neutral-wind and radar-echo observations, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 1781-1784, 1998.