

Sq 電流系と熱的電子の振舞いとの関係  
—K-9 M-81/S-310-18 号機による測定結果—

小山孝一郎・雨宮宏<sup>\*1</sup>・A. Piel<sup>\*2</sup>  
H. Thiemann<sup>\*3</sup>

Behavior of Thermal Electrons Near the Focus  
of Sq Current Vortex

By

K. -I. Oyama, H. Amemiya<sup>\*1</sup>, A. Piel<sup>\*2</sup>,  
H. Thiemann<sup>\*3</sup>

**Abstract:** K-9M-81 and S-310-18 rockets were launched on the 25th and 26th of January, 1988 in order to find a heating mechanism of thermal electrons. Solar radio flux was 94.9 and 93.5 respectively for K-9M-81 and S-310-18 rockets. Sun spot numbers are 33 and 44. Electron temperature at the heights of 100 ~120 km is nearly equal to the possible neutral temperature on the 25th, January, whilst electron temperature profile on the 26th, January shows a hot electron layer at the height of  $\approx 105$  km. Electron temperature is 700 K in the layer. It is concluded that the difference between these two profiles is due to the different distance of Sq current focus from the observation points.

---

\*1 理化学研究所：Institute of Physical and Chemical Research

\*2 西独 Kiel 大学：Universität Kiel, Institut für Experimental Physik

\*3 西独物理技術研究所：Physikalisch-Technische Studien G. M. B. H.

## 概 要

高度 100 km~120 km 付近において電子温度を中性ガス温度より高くする熱電子の加熱機構を探るため 1988 年 1 月 25 日, 1 月 26 日日本標準時間午前 11 時に K-9 M-81 号機及び S-310-18 号機がそれぞれ発射された。太陽電波束は 1 月 25 日, 26 日はそれぞれ 94.9, 93.5 で太陽黒点数は 33 及び 44 であった。K-9 M-81 号機において得られた電子温度は高度 100 km ではほぼ中性ガス温度を示し, S-310-18 号機においては高電子温度層が見られ, 層中の最大電子温度は 700 K であった。両者の違いは  $Sq$  電流系の目玉からの距離によるものと考えられる。

### 1. はじめに

高度 100 km~120 km 付近において測定された電子温度に関する問題はロケット実験の歴史以来, 長い間議論されてきた。即ち問題は中性ガス密度 $\sim 10^{12}$  コ/cc, 中性ガス温度  $T_n \sim 250$  K の環境の中で電子密度  $10^5$  コ/cc の熱的電子がなぜ  $T_n$  より高い  $T_e$  を持ちうるか? という事である。この問題は 1960 年代に多くの研究者により議論されたにもかかわらず, 現在まで解決されずに残っている E 層熱エネルギー収支に関する大問題である。

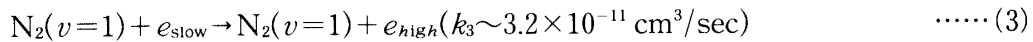
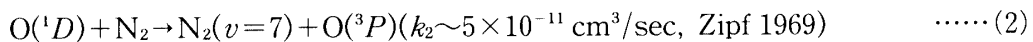
ロケット実験により得られた電子温度値の信頼性に対して過去に多くの疑問が出された。その根拠は太陽紫外線による熱入力を考えると電子温度を中性ガス温度より 10 K 上昇させることも不可能であることは容易に計算できる事による。しかしながら我々は以下の理由により in-situ に観測される電子温度は正しいと信ずる (Oyama et al., 1980)。

1. 電離層を流れる観測される  $Sq$  電流層の高さは高度 105 km において  $T_e = 1.2 T_n$  とすると理論と合わせる事ができ, また観測された電子密度についても同じ事が言えた (Duhau et al., 1987; Azpiazu and Duhau, 1982)。
2. 高度 100 km~120 km 付近において観測された中性ガス—電子衝突周波数は電子温度が中性ガス温度より高いとすると説明できる (Beynon and Owen Jones, 1965; Thrane and Piggot, 1966)。また高度 100 km 付近で地上からの電波をロケット上で受信することによって得た電子—中性ガス衝突周波数は  $T_e/T_n > 1$  である事を示している (長野, 1989)。
3. 高度 100~120 km 付近での電子温度は太陽電波束によって系統的に変化する (Smith et al, 1968)。
4. 日本における電子温度プローブと西独におけるレゾナンスコーンプローブによる実験結果は驚くほど一致している (Piel et al, 1989)。また北欧で行われた電子温度プローブと IS レーダによって, 高度 100~110 km で得られた値も一致している (Schlegel and Oyama, 1988)。

従って多くの理論研究者の主張にもかかわらず（たとえば，Ashihara and Takayanagi, 1974）高度 100～120 km では多くの場合  $T_e > T_n$  であると考えざるを得ない．次の質問は従って「なぜ  $T_e > T_n$  となりうるか？」である．この質問に対して

- (a) 局部的に存在する強い電場，磁力線に平行，あるいは垂直な電場による加熱
- (b) 高速荷電粒子あるいは非熱的電子の降り込みによる加熱
- (c) 化学反応による加熱

等が考えられる．このうち(a)の局所的な電場の存在の可能性および(b)にあげた高速粒子の存在については特に高い電子温度の層が現れる日本上空での冬季 11 時ごろの観測結果を見ても過去にそのような実験事実がないし，一般的にこのような場の存在を考える事は無理な事のように思えるが，この可能性はまだ捨てきれない．また，0 eV～数 eV 領域の電子の存在と(c)に挙げたようにまだ我々が見落としていると思われる化学反応が高度 100～120 km 付近の熱電子の加熱に寄与している事も考えられる．高度 100 km 付近に午前 11 時頃に現れた極端に電子温度の高い事例 (Oyama and Hirao, 1979) を除いて一般的に  $T_e$  が  $T_n$  より高くなることの可能性については過去に J. Walker (1969) が報告している．即ち彼の考えによると

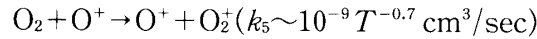


の反応によって熱電子が振動的に励起された窒素分子からエネルギーを得ているとするものである．Walker は NASA 6.07 ロケットで得られた電子温度(高度 110 km において  $T_e =$  約 900 K,  $n_e = 8.4 \times 10^4$  コ/cc)を説明するため振動温度  $T_v$  を持つ窒素分子から電子がエネルギーを得ているとした． $T_v$  を求めるために窒素分子から電子がエネルギーを得るレート  $Q_e$  を電子の中性ガスへの損失レート  $L_e$  と等しいと置く．彼によると高度 100～120 km での  $T_v$  はこの場合 3300 K でなければならない．また Loureiro (1986), Capitelli (1986) 及び Paniccia (1986) 等は振動励起されて振動温度  $T_v$  を持つ窒素ガス  $\text{N}_2^*$  中での電子エネルギー分布を論じているが宇宙空間において  $\text{N}_2^*$  から熱的電子がエネルギーを得ている事を示唆する実験事実は我々以外 (Oyama and Hirao, 1985) 報告されていない．

私たちは，室内実験によりロケット実験で得られたと似たようなエネルギー分布を得ており (小山, 1989 a), 上記した(1)(2)(3)の反応，あるいはこれに類似した反応が高度 100 km 付近で起こっている可能性が強い．

\*  $e + \text{O}({}^1D) \rightarrow e + \text{O}({}^3P)$  において反応係数は  $k \sim 4.5 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{sec}$  であると考えられている．従ってこの反応は上記(2)より一桁早い， $\text{N}_2$  分子の数と電子の数とでは  $10^6$  倍の差があるため，(1)(2)(3)の一連の反応過程の中ではこの反応は無視できると考えられる．

高度 100 km 付近における  $O^+$  密度  $n(O^+)$  は以下の反応により決定される.



従って

$$n(O^+) = \frac{q(O^+)}{k_5 n(O_2) + k_6 n(N_2)}$$

ここで  $q$  は光電離による生成率である. もし大気組成,  $k_5$ ,  $O^+$  及び太陽フラックス, 吸収及び電離断面積を知ると  $k_6$  を未知数として計算できる.  $k_6$  は Schmeltekopf により  $N_2$  の振動温度  $T_v$  に影響される事が分かっている (Schmeltekopf et al., 1967). 太陽活動度, 地磁気静穏時に観測された  $O^+$  密度を入れて計算された  $k_6$  は Dunkin (1968) によって得られた値より一桁大きく, この  $k_6$  は Schmeltekopf の実験結果に従って  $T_v$  に焼き直すと高度 100 km 付近で  $T_v/T_n \approx 6$  に達する (Azpiazu and Duhau, 1987). 上記のように  $O^+$  を理論的に評価するためにも  $T_v$  を測定する事が必要である.

1月から2月にかけて行われた過去のロケット実験によると日本標準時11時頃には高度100~120 km 付近の電子温度が上昇するが, この場合熱的電子エネルギー分布には High energy tail があることが知られている (Oyama et al., 1983). 今後の研究課題の一つはこの High energy tail の生成機構の解明である. K-9 M-81/S-310-18 号機による実験は特にこのスーパーサーマル領域の電子の存在と窒素分子の振動温度を測定する事によって, 高度 100 km 付近の熱エネルギー収支を解明する手がかりを得ようとした.

## 2. 搭載計器

上記した事象の解明に必要と思われる地理物理パラメータを同時に測定するため以下の測定器を K-9 M-81 号機及び S-310-18 号機の 2 機のロケットに搭載した. これらの測定器の役割は以下の通りである. K-9 M-81 号機に搭載された分光計は波長 3000~4000 Å 領域に存在する  $N_2^+$  の発光スペクトルの強度から窒素分子の  $T_v$  を推測する. K-9 M-81 号機にはまた 0~2.5 eV までの熱的電子のエネルギー分布を調べるため直径 3 mm  $\phi$   $\times$  20 cm 長の円筒プローブに高周波振幅にプローブ掃引電圧を重畳し, プローブの周りに形成されるシースの非直線性によって生じたプローブ電流の中から二次高周波成分のみを検出する事により電圧電流特性の二次微分を得た. この二次微分と電子エネルギー分布とは,

$$F(E) = (4m_e^{1/2} V^{1/2} / e^{5/2} \cdot S) d^2 i / dV^2 \times 10^{-6} \text{ els/eV} \cdot \text{cm}^3$$

ここで  $E$  は eV で表す電子エネルギー,  $V$  は周りのプラズマに対するプローブの電圧,  $e(1.6 \times 10^{-19})$  及び  $m_e(9.1 \times 10^{-31} \text{ kg})$  はそれぞれ電子の電荷, 質量である.  $S(19.96 \times 10^{-4} \text{ m}^2)$  はプローブの表面積である.

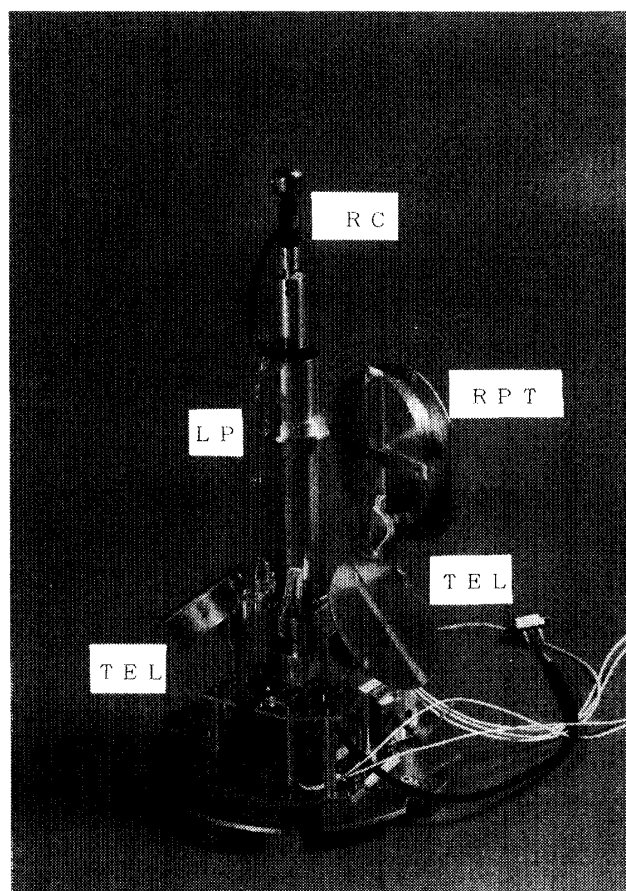


図1 K-9 M-81号機に搭載された電子温度プローブ (TEL-1, TEL-2), ガラス封入型ラングミュアプローブ (LP), リターディングポテンシャルトラップ (RPT), 及びレゾナンスコーンプローブ (RC)

表1 K-9 M-81号機に搭載された測定器及びその主たる担当者

測定器名	測定量	主担当者
電子温度プローブ	電子温度, ロケット浮動電位	小山
インピーダンスプローブ	電子密度	森岡
分光計	N <sub>2</sub> 振動温度	鈴木
レゾナンスコーンプローブ	電子温度, 電子密度, ビーム成分	Piel
リターディングポテンシャルトラップ	熱的電子エネルギー分布, 電子密度	雨宮
熱的電子エネルギー分布 測定器	熱的電子エネルギー分布, 電子密度, 電子温度	小山
地磁気姿勢計	ロケットスピンレート, スピン軸と磁 場とのなす角	遠山

表2 S-310-18号機に搭載された測定器及びその主たる担当者

測定器名	測定量	主担当者
電子温度プローブ	電子温度	小山
インピーダンスプローブ	電子密度	渡辺
ダブルプローブ	AC/DC電場	岡田
球プローブ	プラズマ揺らぎ	森
低周波受信機	電子-中性ガス衝突周波数	長野
フォトメータ	O <sub>2</sub> 密度	牧野
地磁気姿勢計	ロケットスピンレート, スピン軸と磁場との成す角	遠山

の式で関係付けられる (Druyvesteyn, 1930)。西独から招待したレゾナンスコーンプローブは日本の電子温度プローブ及びインピーダンスプローブとの比較測定を行った。レゾナンスコーンプローブはまた1%以上の電子ビーム成分を検出できる可能性があるが (Piel et al., 1988), 残念ながら K-9 M-81 号機による実験では後述するような理由で検出できなかった。

この他に京都大学 MU レーダ (深尾) によるイオン温度, 電子密度の観測及び通信総合研究所山川観測所の電離層観測機による電離層の観測を行った (付録に付けた図参照)。

S-310-18 号機においては, 固定バイアスを印加した球プローブによるプラズマ密度の揺らぎ及びダブルプローブによる電場の揺らぎ成分の測定と共に地上局からの 17.4 KHz 電波の電界強度を測定した。下部電離層を通過する電波の減衰は概ね電子密度と衝突回数との積に比例し, 従って電子密度分布と電波の減衰量を同時に測定すれば衝突回数が求められることになる。衝突回数と電子温度との関係は

$$\nu_m = kPT_e/T_n$$

(ここに  $k, P, T_e, T_n$  はそれぞれ比例定数, 大気圧, 電子温度, 中性粒子温度である) を使い,  $T_e/T_n$  を見積った。1.27  $\mu\text{m}$  の光強度を測定して O<sub>2</sub>( $\Delta g$ ) 密度の高度分布を得, この結果をもとに 70~90 km でのオゾン密度分布, 90 km 以上での酸素原子密度を導出する。このことにより逆に静水圧平衡を仮定して  $T_n$  を求めることができる。

標準型の電子温度プローブ, 及び電子密度プローブは S-310-18 号機にも搭載され, 背景となるプラズマ密度, 電子温度を測定した。ここで報告するのは K-9 M-81 号機によって得られた熱的電子のエネルギー分布, K-9 M-81 号機及び S-310-18 号機によって得られた電子温度プローブの結果である。

### 3. 熱的電子エネルギー分布及び電子温度

#### 3.1 K-9M-81号機による結果

K-9 M-81 号機は発射後 51 秒後開頭, 52 秒にプローブ突出し, 57 秒にリターディングポ

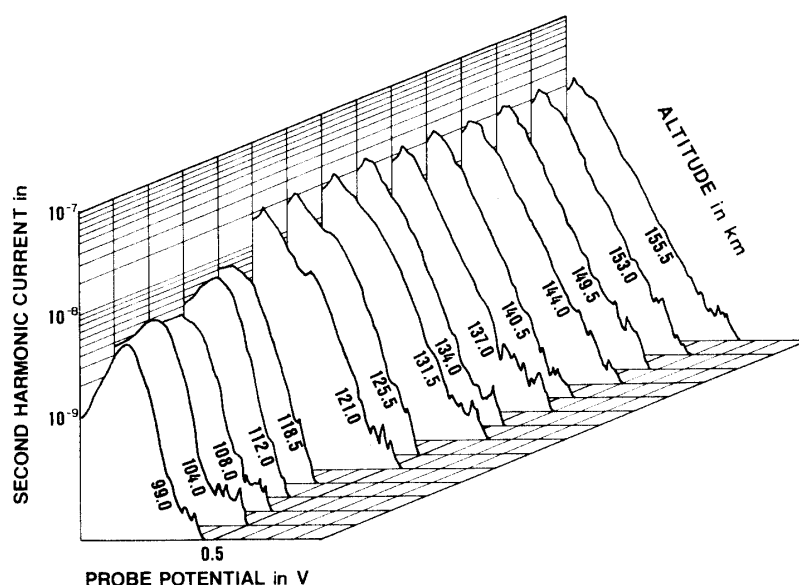


図2 K-9 M-81号機によって得られたプローブ電流の二次高調波成分の片対数プロット。横軸は空間電位と思われる点を基準としたプローブの電位（従って電子のエネルギーに相当する）。

テンシャルトラップの蓋開けを行い、それぞれの計測器が観測を開始した後、発射後300秒で最高高度350 kmに達した。開頭後のスピンは $1.78 \pm 0.01$  Hz、プリセッション周期は約70秒であった。地球磁場の磁力線とロケットスピン軸とのなす角は $36 \sim 53^\circ$ まで変化した。従ってスピン軸に直角に展張された熱的電子エネルギー分布測定用の円筒プローブ（直径3 mm、長さ20 cmの円筒プローブは地上でガラス管に封入され、真空中で約 $200^\circ\text{C}$ でベークされる）と地球磁場のなす角は $37 \sim 54^\circ$ まで変化した。図2にプローブ電流から得た二次高調波成分の振幅を空間電位と思われる点を基準にしたプローブ電位に対してプロットした。二次高調波成分は対数プロットしてあるので、電子がマクスウェル分布状態にあるか否かは、二次高調波成分の片対数プロットの直線から知られる。K-9 M-81号機の場合、高度121 kmから134 kmまでを除いてほとんど直線でこれから得た温度は中性ガスに等しい。またこの値は電子温度プローブによって得た値と西独のレゾナンスコーンプローブとは極めて良い一致を示している（図3）。高度100 km以下において高度が下がるにつれ電子温度は急に上昇するが、この値がロケット進行方向の前面に生じる衝撃波によるものか、あるいは真に地球物理的に意味があるものか検討中である。高度121 kmから134 kmまでに得られた二次高調波成分には0.3 eV付近にハンプが見られる。このハンプは振動励起された $\text{N}_2$ と熱的電子との相互作用によるものと考えられる（小山, 1989 b）。

### 3.2 S-310-18号機による電子温度の測定

S-310-18号機の前部には電子温度プローブが搭載された（先端に取り付けられるプローブとエレクトロニクスの写真を図4に示す）。これにより得られた電子温度は図5にK-9

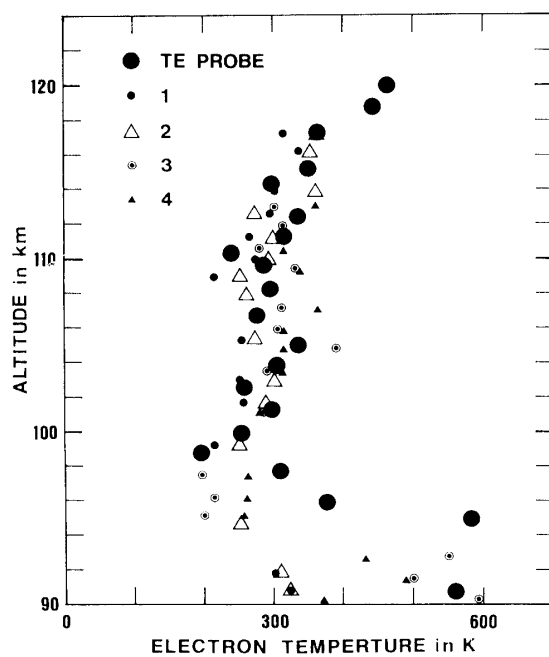


図3 レゾナンスコーンプローブと電子温度プローブによる  $T_e$  の比較。図中数字の1, 2, 3, 4はレゾナンスコーンプローブの測定モードの違いによる (Piel et al., 1988)。

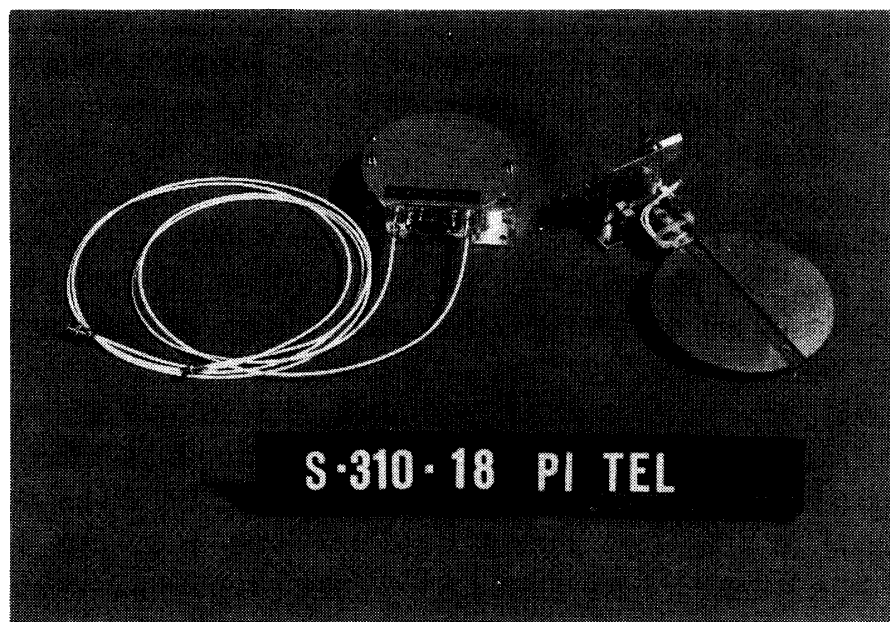


図4 S-310-18号機の先端に搭載された電子温度プローブ。



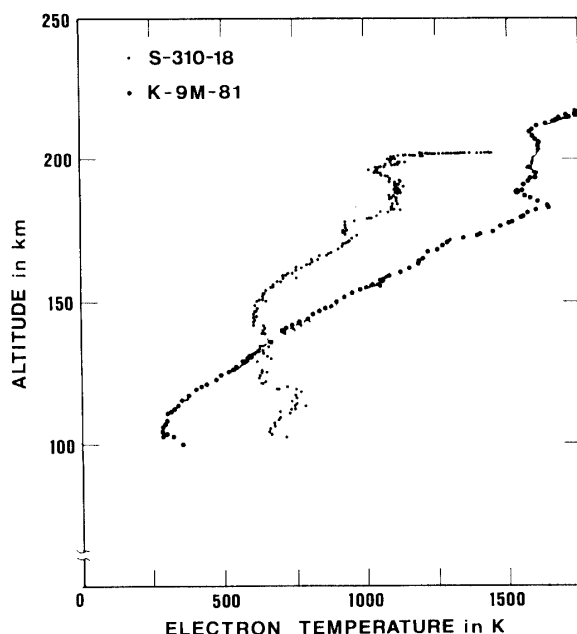


図5 S-310-18号機及びK-9M-81号機に搭載された電子温度プローブにより得られた電子温度の比較。

M-81号機により得られた温度と共に示されている。K-9M-81号機による高度105 km付近の電子温度がほぼ考えられうる中性ガス温度と等しかったのに対し、S-310-18号機による電子温度は高度105 kmにおいて明かなピークを持つ。高度約135 kmからはK-9M-81号機によって得られた電子温度がS-310-18号機によって得られた電子温度より高くなる。S-310-18号機のspinは $1 \pm 0.01$  Hz、プリセッション周期は $203 \pm 1$  秒、スピン軸と磁力線とのなす角は飛行中 $24 \sim 37^\circ$ と変化した。プローブ電極の法線はspin軸に平行であり、従って電極法線と磁力線のなす角も $24 \sim 37^\circ$ である。

#### 4. 議 論

4.1. 1月25日、26日の両者における太陽電波束はそれぞれ94.9、93.5で太陽黒点数は33及び44でこの二つのパラメータに関する限り殆ど同じ地球物理環境にある。実際両者によって得られた電子密度プロファイルは高度200 kmまでほぼ一致する。しかし付図3、4に見られるように、通信総合研究所山川電波観測所におけるFoF2は1月25日11時に5 MHz、1月26日11時には6.2 MHzと異なる (Ionospheric data in Japan for January, 1988)。この事は高度200 km以上においてはK-9M-81号機によって得られた電子密度よりS-310-18号機による方が高かった事を意味する (H'Fは共に210 kmである)。高度90 km付近での電子密度はそれぞれ $7 \times 10^4$  els/cc、 $3 \times 10^4$  els/ccである ( $F_{\min}$ は共に1.6 MHzである)。

K-9M-81号機によって得られた高度100 km付近における電子温度は考えられる中性

ガス温度より約 50 K 高いが、これはほぼ中性ガス温度に等しいと見る事ができよう。一方 S-310-18 号機により得られた電子温度は高度 105 km において約 700 K である。

前記したように K-9 M-81 号機による熱的電子エネルギー分布の観測によれば熱的電子は高度 95 km 以上ではマクスウェル分布している。また比較測定のために行われたレゾナンスコーンプローブによる観測は電子温度プローブによるものと一致しており、この測定の信頼性を疑う事はできない。ではなぜほぼ同じ地球物理条件でもこのような違いが出てくるのであろうか。

この事を調べるために過去に日本で午前 11 時に得られた電子温度プローブによる電子温度データを再度検討した\*。表 1 にはこれまで電子温度プローブが搭載され、午前 11 時に発射された観測ロケットがまとめられている (S-520-6 号機を除いてすべて午前 11 時に発射されている)。図 6 は太陽黒点数で示した太陽活動度サイクル上に観測ロケットが打ち上げられた時の黒点数をプロットしたものである。

表 1 日本標準時 11 時±1 時に発射されたロケット

ROCKET	DATE	SOLAR DATA			TEMP MAX	(K) MIN
		K <sub>p</sub>	S <sub>a</sub>	R <sub>z</sub>		
L-3 H-6	21. JAN. 70,	0 <sup>+</sup>	177.0	120	1480	680
S-210-4	16. JAN. 71,	3 <sup>-</sup>	156.4	65	650	410
K-9 M-34	24. JAN. 71,	2 <sup>-</sup>	177.0	99	865	585
S-210-6	21. JAN. 72,	2 <sup>-</sup>	127.9	78	525	350
K-9 M-45	16. JAN. 74,	3	90.0	64	900	440
K-9 M-47	19. SEP. 74,	6 <sup>-</sup>	91.7	58	290	290
K-9 M-55	16. SEP. 76,	2 <sup>+</sup>	75.8	14	250	250
K-9 M-62	22. JAN. 78,	1	96.9	30	3100	2100
S-310-5	31. JAN. 79,	3	193.7	130	490	490
K-9 M-72	13. FEB. 82,	5 <sup>+</sup>	194.9	148	690	690
S-520-6	29. AUG. 83,	3 <sup>-</sup>	105.7	52	450	450
K-9 M-81	25. JAN. 88,	1	94.9	40	350	350
S-310-18	26. JAN. 88,	1	93.5	39	750	600

\* この場合、後述するように S<sub>q</sub> 電流系の目玉付近で電子温度プローブで得られた高い電子温度はマクスウェル分布状態にない電子ガスの中で得られたため、真の意味での電子温度ではないが、いずれにしても全体として熱電子が高いエネルギーを持つことは確かである。

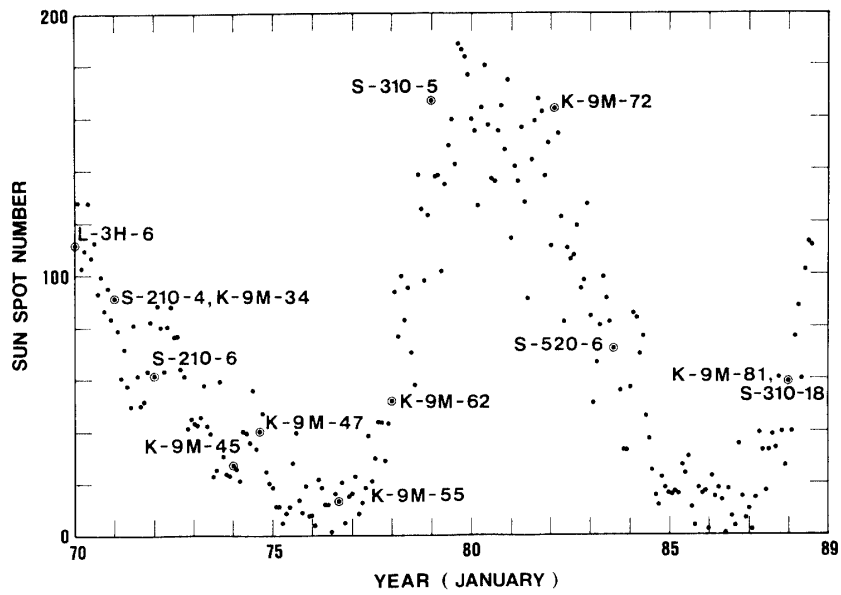


図6 過去において日本標準時11時±1時に発射された観測ロケットのリスト。太陽黒点は月平均値。

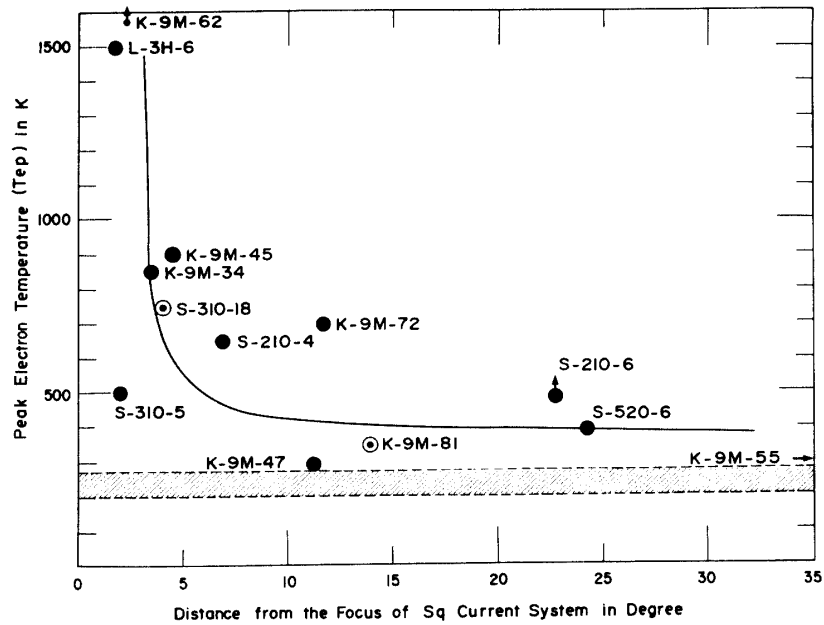


図7  $S_q$  電流系の中心からの距離（緯度差）と高度100~120 km付近の最大電子温度  $T_{ep}$  との関係。ハッチした部分は CIRA モデルから得た高度100~120 km の中性ガス温度。●印は今回測定した K-9 M-81 号機及び S-310-18 号機によるデータ。

図7に高度100~120 km付近における最大電子温度  $T_{ep}$  (高電子温度層が見られる時は層中のピークの電子温度, 高電子温度層がはっきり見られない時はこの付近での最大温度) と  $S_q$  電流の目玉であると推定される位置と内之浦(観測点)との距離を緯度でプロットした。電子温度の測定のばらつきは得られたプロファイルによるが, 図7中にプロットされた値を中心として平均して $\pm 100$  Kである。 $S_q$  電流系の目玉の位置は図8に示すように北海道の女満別, 柿岡, 及び鹿屋の三つの気象庁地磁気観測所で得られたマグネットグラムを使いロケットが発射された日の日本標準時午前11時におけるH成分とその日の真夜中におけるH成分からの差を三つの観測所の緯度に対してプロットし, 上記したH成分の差が零になる点から決めた。この場合  $S_q$  電流は午前11時に最強となるとする。このようにして  $S_q$  電流の目玉の位置を求める手法は以前 Tarpley (1973) によってなされている。図には CIRA 1972 から得た高度100~120 km での中性ガス温度を参考のため示した。

図7から得られる一般的な結論は  $S_q$  電流系の目的に近づけば近づくほど高度100~120 km 付近の電子温度のピーク ( $T_{ep}$ ) は高くなるという事である。さらに太陽活動度を考慮して太陽電波束, 太陽黒点に対し  $T_{ep}$  を  $S_q$  電流系の目玉からの距離に関係なくプロットすると図9のようになる。即ち  $T_{ep}$  は太陽電波束, 太陽黒点数が大きくなればな

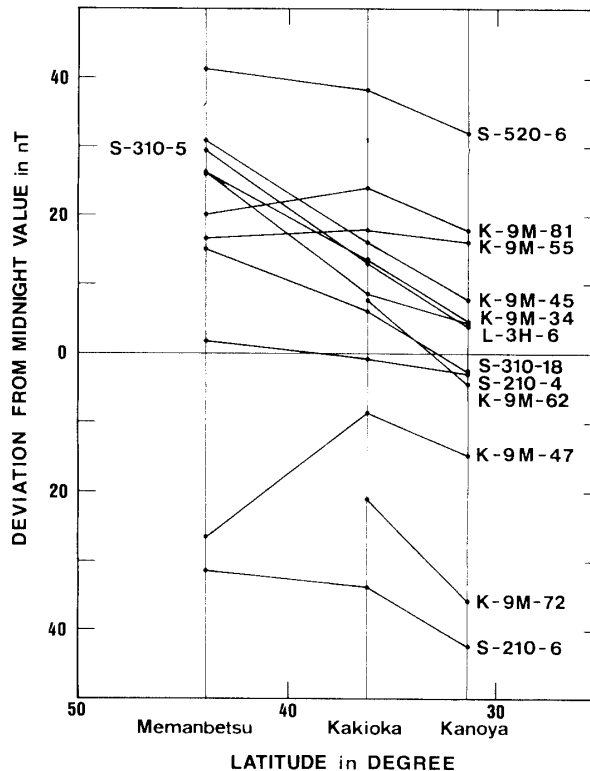


図8 過去において日本標準時11時にロケットが発射された日の  $S_q$  電流系の目玉を算出する方法。

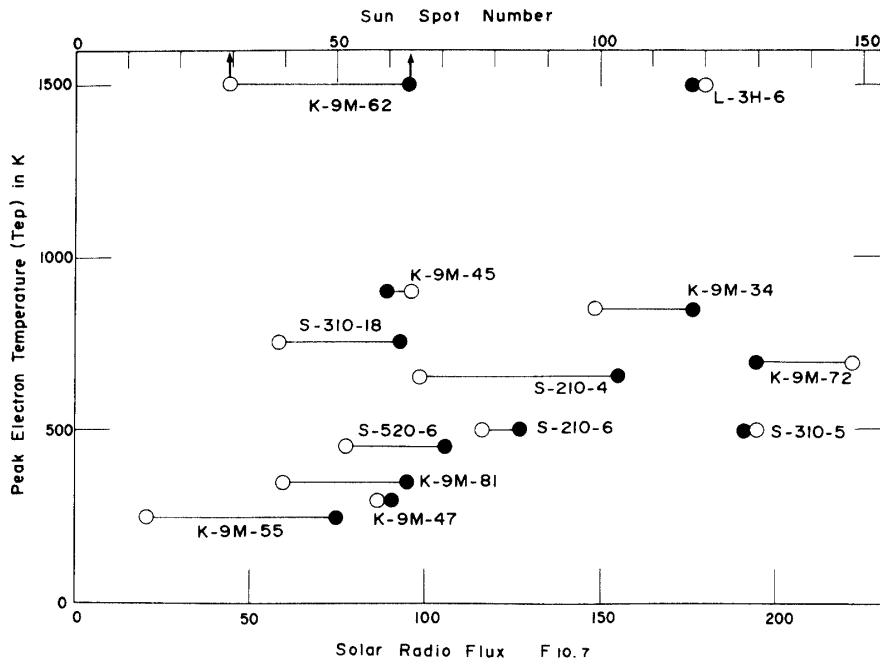


図9 100~120 km 付近の高い電子温度層中の最高温度 ( $T_{ep}$ ) と太陽電波束  $F_{10.7}$  (●印) と太陽黒点数 (○印) との関係。

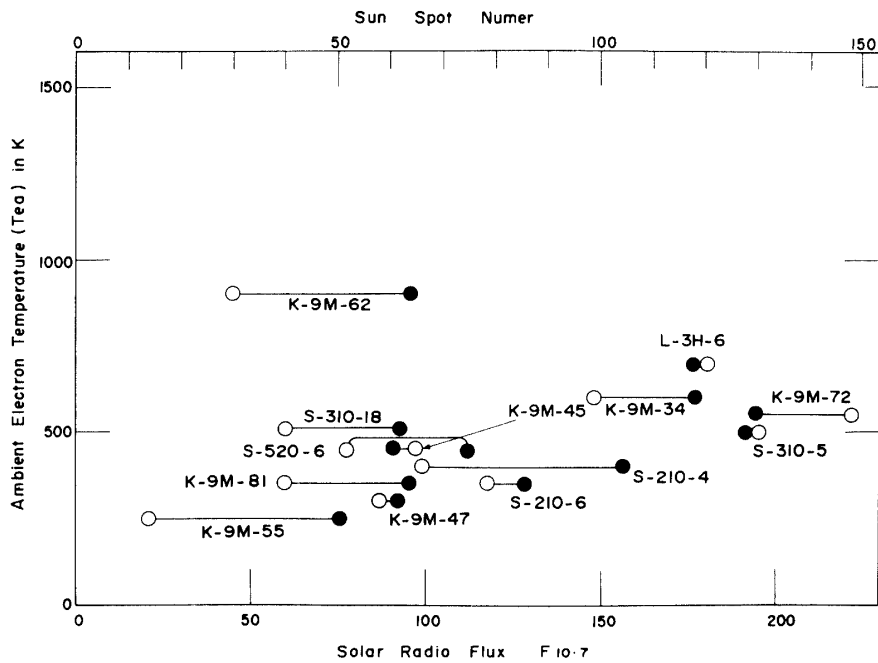


図10 100~120 km 付近の背景の電子温度  $T_{ea}$  と  $F_{10.7}$  (●印), 及び太陽黒点数 (○印) との関係。

るほど上昇する。一般的な傾向から大きくはずれていると思われるのは、K-9 M-62, L-3 H-6, K-9 M-45, 及び S-310-18 によって得られた電子温度である。更に図 10 に示すようなピーク電子温度外での電子温度  $Tea$  を太陽電波束, 太陽黒点数に対しプロットした。 $Tea$  も太陽電波束, 太陽黒点数の増加と共に上昇する。K-9 M-62 号機による結果は特に他のプロファイルからはずれている。

最後に図 11 には  $Tep-Tea$  と  $Sq$  電流系の目玉からの距離を示した。図 11 から見られるように  $Sq$  電流系の目玉に近づくにつれ電子温度は上昇する。特に目玉より約  $6^\circ$  以内ではその上昇は急激となる。従ってこの温度上昇域が目玉を中心にして円状に広がっているとすると 11 時を中心にして  $\pm(24 \text{ 分}) (6/360 \times 24 \times 60 \text{ min})$  の時間内で高い電子温度を持つ層が見られることになる。図 9, 10, 11 の 3 図を総合すると以下のような結論を引き出すことができると思われる。

1.  $Sq$  電流系の目玉に近い約  $6$  度以内では電子温度のピークは急に高くなる。また、電子温度のピークは太陽活動度に依存する。
2.  $Sq$  電流系の目玉から  $6$  度以上離れると高度  $100 \sim 120 \text{ km}$  にはピークは現れなくなる。この高さの電子温度は太陽電波束, 太陽黒点数の増加と共に上昇する。

我々は過去に「高い電子温度層は冬 11 時頃にしか現れない」と結論した (Oyama and Hirao, 1979) がこの結論は「 $Sq$  電流系の目玉が観測点に緯度にして  $6^\circ$  以内に近づいた時に現れる」と言い替えることができる。このことは西太平洋ゾーンにおいて特に冬期 1 月には統計的に  $Sq$  電流の目玉が北緯  $31^\circ$  (鹿児島宇宙空間観測所の緯度は  $31.15^\circ \text{ N}$  である) にあったとする Tapley (1973) の解析の結果からも納得できる。Tapley によると 2 月に

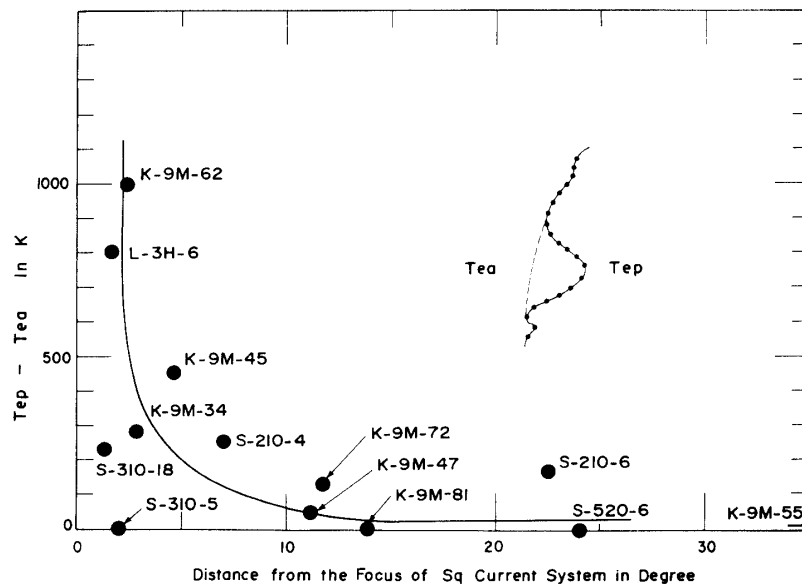


図 11 測定された電子温度プロファイルから求めた  $Tep-Tea$  と測定点の  $Sq$  電流系の目玉からの距離。

は  $Sq$  電流系の目玉は鹿児島より北へ，8，9月には鹿児島より南へ位置する。

特に K-9 M-81 号機と S-310-18 号機により得られた結果は  $Sq$  電流系の目玉の位置の違いによって高度 100~120 km 付近の電子温度の違いが見られるという過去に我々が統計的に得た結果をほぼ同じ太陽電波束，太陽黒点数のもとで確認した事において有意義であると考えられる。

## 5. 結 論

K-9 M-81 号機及び S-310-18 号機によって得られた電子温度，熱的電子エネルギー分布を過去に得られた電子温度，熱的電子エネルギー分布と共に議論した。 $Sq$  電流系の目玉を中心として緯度にして約 6 度，時間にして約  $\pm 24$  分以内において冬期に高度 100~110 km 付近に高い電子温度の上昇が見られる。この場合，電子エネルギー分布には熱的電子エネルギー領域に続く高いエネルギーの成分があることが確認されている (Oyama, 1989 c)。この領域より遠ざかると電子温度は太陽活動度に依存した値を示すと共に，上記したような高いエネルギーの成分も見られなくなる。 $Sq$  電流系の目玉付近で電子温度が上昇するという観測結果から見て，高度 100~120 km 付近の電子に関する熱エネルギー収支については，我々が考えているような振動励起された窒素分子から熱的電子がエネルギーを授受する反応に加えて，例えば  $Sq$  電流系の目玉付近に流れ込む沿磁力線電流の効果（この場合，ここに述べた High energy tail の電子が電流 Carrier としての役目を負っているかもしれない）を考えられるかも知れない。

本ロケット実験は E 層熱エネルギー収支に関する総合実験で，特に振動励起された  $N_2$  の振動温度を測定することであったが，残念ながら現在まで良好な結果は得られていない。高度 100 km 付近の  $N_2$  振動温度を測定することは，今まで見過ごされていた電離層 E, F 領域における電子に関する熱エネルギーの流れを解明するために本質的であると考えられる (Zipf, 1968; Varnum, 1972; Kummler and Bortner, 1972; O'Neil, 1974, Vlasov, 1977)。

## 謝辞

S-310-18 号機及び K-9 M-81 号機による実験は，関係諸機関の多大の協力のもとに行われた。ここに謝辞を表す。両機に搭載された電子温度プローブ，K-9 M-81 号機に搭載された熱的電子エネルギー分布測定器は松栄電子(株)によって制作された。本実験に使用したガラス管封入型プローブは理化学研究所 菅原正吾氏により作られた。

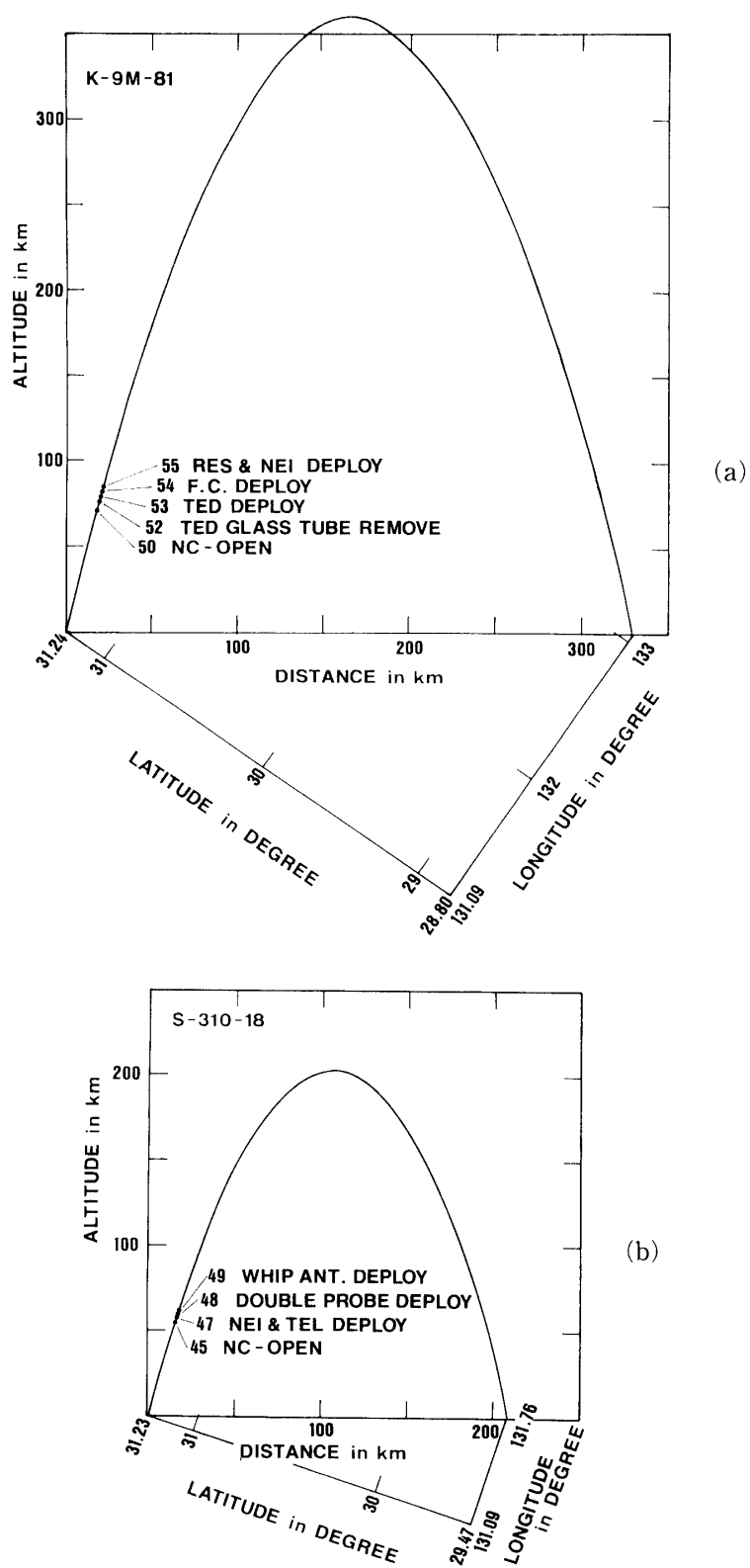
## 参 考 文 献

- [ 1 ] Ashihara, O and K. Takayanagi, Velocity distribution of ionospheric low-energy electrons, Planet, Space Sci., 22, 1201-1217, 1974.
- [ 2 ] Azpiazu, M. C. and S. Duhau, Anomalous heating of the electron gas in the E-region, Proceedings of the international conference in plasma physics, Kier, 1987.

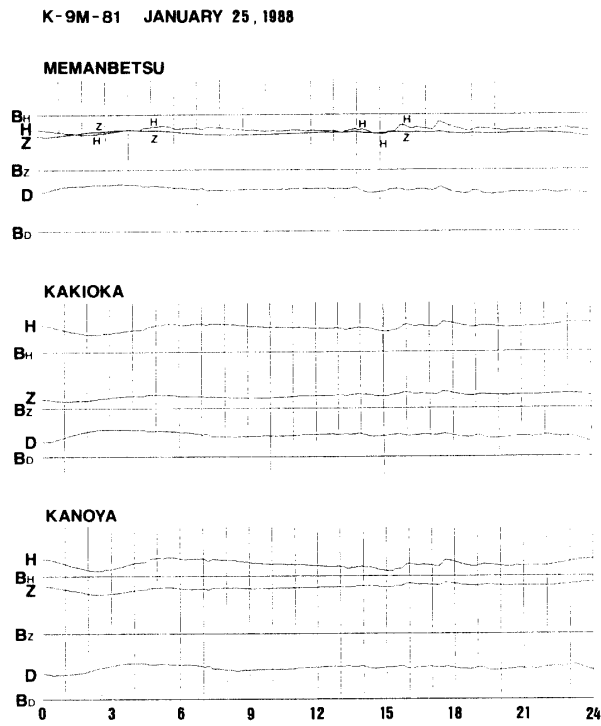
- [ 3 ] Azpiazu, M. C. and S. Duhau, Daytime E-region ion and nitric oxide densities, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **15**, 933-940, 1982.
- [ 4 ] Beynon, W. J. G. and E. S. Owen Jones, Some medium latitude radio wave absorption studies, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **27**, 761-733, 1965.
- [ 5 ] Capitelli, M., C. Gorse and A. Ricard, Coupling of vibrational and electronic energy distributions in discharge and post-discharge conditions, *Topics in current physics*, **39**, Nonequilibrium vibrational kinetics edited by M. Capitelli.
- [ 6 ] Druyvesteyn, M. J., *Der Niedervolt Bogen*, *Z. Physik*, **64**, 781-798, 1930.
- [ 7 ] Duhau, S., M. De LA Vega and M. C. Azpiazu, Effect of the electron temperature in the electron number density and dynamics of the equatorial E-region, *Planet. Space Sci.*, **35**, 1-9, 1987.
- [ 8 ] Dunkin, D. B., F. C. Fehsenfeld, A. L. Schmeltekopf and E. E. Ferguson, Ion-molecule reaction Studies from 300 to 600K in a temperature controlled flowing aftergrow system, *J. Chem. Phys.*, **49**, 1365-1371, 1968.
- [ 9 ] Kummler, R. H. and M. H. Bortner, Vibrational temperature in the E and F regions, *Space Res.*, XII, 711-719, 1972.
- [10] Loureiro, J and C. M. Ferreira, Coupled electron energy and vibrational distribution functions in stationary N<sub>2</sub> discharges, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **19**, 17-35, 1986.
- [11] O'Neil, R. R., W. R. Pendelton, A. M. Hart and A. T. Stair, Vibrational temperature and molecular density of thermospheric nitrogen measured by rocket borne electron beam induced luminescence, *J. Geophys. Res.*, **79**, 1942-1958, 1974.
- [12] Oyama, K. -I. and K. Hirao, Anomalous heating of the thermal electrons near the focus of the Sq current vortex, *J. Geomag. Geoelectr.*, **31**, 11-19, 1979.
- [13] 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.
- [14] Oyama, K. -I. and K. Hirao, Energy gain of supra-thermal electrons from the excited neutral gases, *J. Geomag. Geoelectr.*, **37**, 913-926, 1985.
- [15] Oyama, K. -I., Suprathermal electrons near the focus of Sq current system, 投稿準備中, 1989 c.
- [16] 小山, 窒素-酸素混合プラズマへの紫外光の照射について, 投稿準備中, 1989 a.
- [17] 小山, 振動励起された窒素分子と熱的電子との相互作用について, 投稿準備中, 1989 b.
- [18] Oyama, K. -I., 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**, 207-211, 1980.
- [19] Paniccia, F., C. Gorse, J. Bretagne and M. Capitelli, Electron energy distribution functions in molecular nitrogen; The role of superelastic electronic collisions in discharge and post discharge conditions, *J. Appl. Phys.*, **59**, 4004-4006, 1986.
- [20] Piel, A., K. -I. Oyama, H. Thiemann and A. Morioka, Resonance cone measurements of non-thermal plasma properties in the mid-latitude ionosphere, *Adv. Space Res.*, **8**, 143-146, 1988.
- [21] Schlegel, K. and K. -I. Oyama, Remote and in-situ plasma measurements during the CAESAR flight, *Proceedings of the 8th symposium on European Rocket and Balloon Programs and related research*, ESA-SP-270, 315-318, 1987.
- [22] Schmeltekopf, A. L., F. C. Fesenfeld and G. I. Gilman, Reaction of atomic oxygen ions



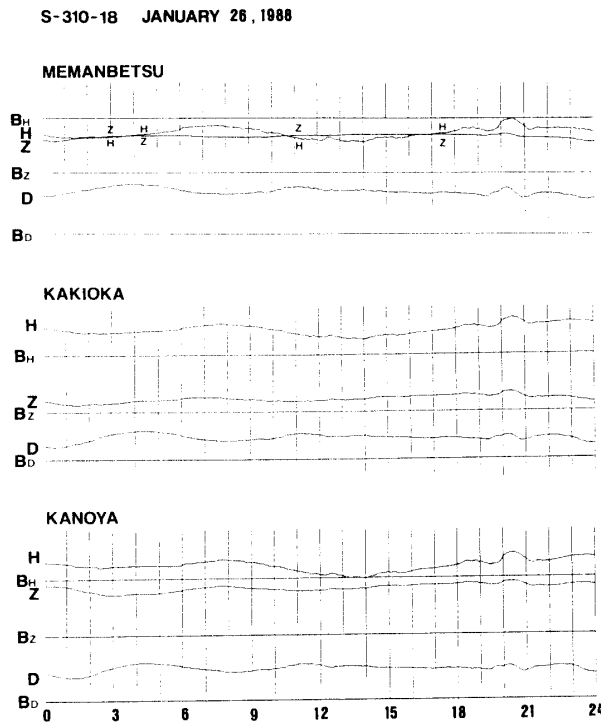
- with vibrationally excited nitrogen molecules, *Planet. Space Sci.*, **15**, 401-406, 1967.
- [23] Smith, L. G. P. J. Mckinnon, and L. H. Weeks, Rocket observations of electron temperature in the E region, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **30**, 1301, 1968.
- [24] Thrane, E. V. and W. R. Piggot, The collision frequency in the E and D region of the ionosphere, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **34**, 969, 1966.
- [25] Tarpley, J. D., Seasonal movement of the *S<sub>q</sub>* current foci and related effects in the equatorial electrojet, *J. Atmos. terr. Phys.*, **35**, 1063-1071, 1973.
- [26] 長野勇, Private communication.
- [27] Varnum, W. S., Enhanced N<sub>2</sub> vibrational temperatures in the thermosphere, *Planet. Space Sci.*, **20**, 1865-1873, 1972.
- [28] Vlasov, M. N., V. I. Chernyshev and V. G. Kolesnik, Distribution of molecular nitrogen by vibrational levels in the upper atmosphere, *Geomagnetism and Aeronomy*, **18**, 440-443, 1977.
- [29] Walker, J. C. G., The vibrational temperature of molecular nitrogen in the thermosphere, *Ann Geophys.*, 831-839, **25**, 1969.
- [30] Zipf, E. C., The collisional deactivation of metastable atoms and molecules in the upper atmosphere, *Can. J. Chem.*, **47**, 1863-1871, 1969.



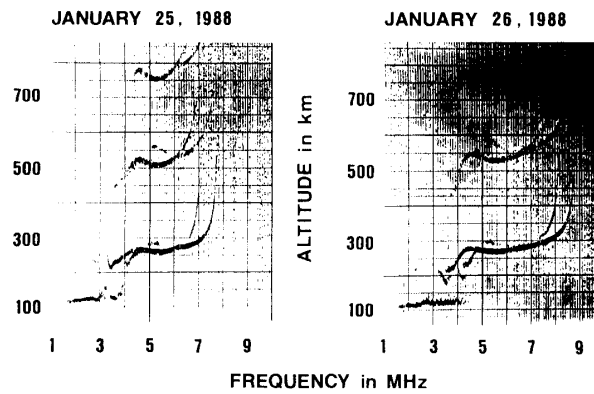
付図1 K-9M-81号機の軌道(a)及びS-310-18号機の軌道(b)



付図 2 a 1月25日 K-9 M-81 号機打ち上げ日の 3 観測所で得られたマグ  
ネットグラム

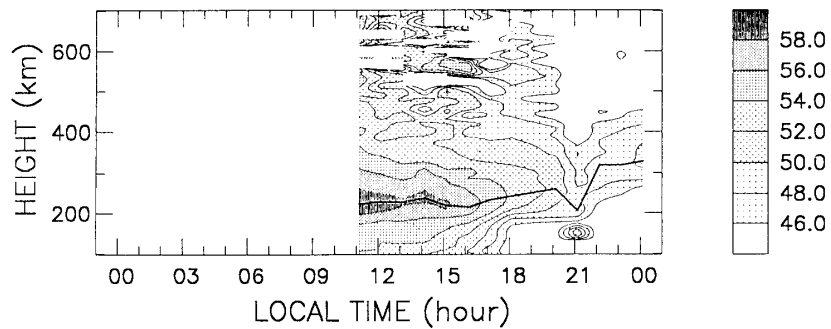


付図 2 b 1月26日 S-310-18 号機打ち上げ日の 3 観測所で得られたマグ  
ネットグラム

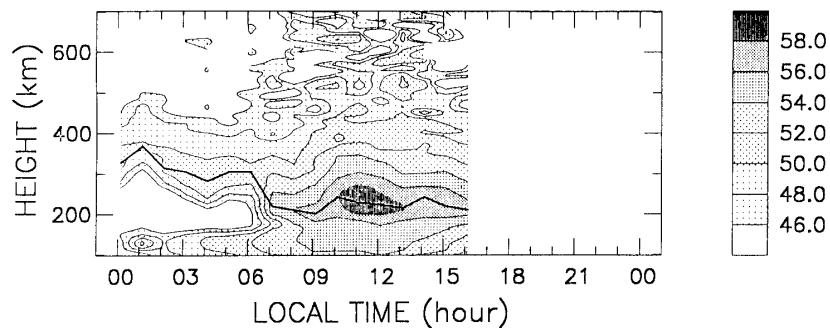


付図3 1月25, 1月26日11時(JST)における通信総合研究所  
山川電波観測所で得られたイオノグラム

25-JAN-1988 09:00:31 - 26-JAN-1988 00:15:16  
10LOG(Ne) (cm<sup>-3</sup>)



25-JAN-1988 23:59:29 - 26-JAN-1988 16:15:21  
10LOG(Ne) (cm<sup>-3</sup>)



付図4 京都大学電波センター, Muレーダにより得られた1月25日, 26日  
の電子密度プロファイル (京都大学深尾教授提供)

10  
Apr 88

## INTERNATIONAL RELATIVE SUNSPOT NUMBERS

Day	May 87	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec 87	Jan 88	Feb	Mar	Apr <sup>†</sup>
01	39	15	13	45	33	34	56	17	47	63	68	110
02	40	11	0	47	38	25	57	16	31	68	66	96
03	27	0	0	39	37	31	57	16	25	68	72	94
04	23	0	0	33	38	58	46	15	23	74	77	74
05	24	10	0	31	39	54	47	19	32	58	64	66
06	27	0	0	32	44	48	27	24	40	43	61	62
07	34	0	9	38	56	39	31	34	58	44	65	84
08	25	0	12	45	67	55	43	36	57	46	67	92
09	23	0	13	39	64	50	42	41	62	50	49	115
10	25	0	11	47	59	51	30	34	68	38	36	107
11	26	11	0	56	58	63	28	22	75	26	20	115
12	23	21	0	48	44	53	25	13	67	14	39	118
13	22	14	0	47	25	74	18	20	76	23	53	120
14	13	10	0	49	20	92	23	26	91	28	62	138
15	39	11	13	49	21	101	22	42	90	33	63	145
16	50	12	17	55	24	101	33	40	83	42	74	148
17	68	14	14	46	25	91	46	39	72	35	99	144
18	54	24	17	43	30	86	48	39	68	55	95	137
19	65	13	23	45	35	82	51	28	73	66	105	108
20	46	22	38	51	38	79	49	26	85	51	85	88
21	41	29	67	48	32	61	51	14	78	27	81	79
22	38	38	87	34	23	50	70	24	66	15	76	72
23	40	37	102	39	26	33	83	17	47	13	74	48
24	38	38	92	35	25	22	56	13	44	23	83	30
25	37	38	88	35	12	29	42	25	33	19	92	44
26	37	41	85	34	12	40	47	27	44	15	93	44
27	35	33	77	24	19	70	21	29	54	31	103	36
28	21	41	60	23	22	79	11	28	67	40	109	43
29	17	25	60	13	26	82	20	30	59	52	104	39
30	15	14	62	10	26	85	16	42	56		108	44
31	12		63	20		62		43	57		120	
Mean	33.0	17.4	33.0	38.7	33.9	60.6	39.9	27.1	59.0	40.0	76.2	88.0

† = preliminary. The yearly mean sunspot number equaled 29.2 in 1987.

Algonquin Radio Observatory

OTTAWA 2800 MHz (10.7 cm) SOLAR FLUX

Adjusted to 1 AU

Day	May 87	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan 88	Feb	Mar	Apr
01	79.3	77.8	76.0	91.0	85.3*	84.2	99.1	87.6	100.1	105.5	99.8*	127.2
02	80.2	77.9	74.4	89.7	85.5	84.8	105.0	86.5	93.7	104.3	99.1	126.5
03	82.8	76.4	73.7	87.1	87.5	85.6*	98.0	85.8	101.2	103.6	101.9*	127.6
04	84.4	77.3	73.2	84.0	89.6	89.2	101.1*	85.1	98.2	103.1	102.6*	122.6
05	86.1	76.1	73.4	81.6	93.5*	90.1	99.2	86.8	99.5	102.6	106.7*	114.6
06	87.9	75.8	73.3	85.2	95.6*	89.5	94.9	85.7	101.7	103.6	107.6	116.8
07	88.1	76.0	74.1	89.5*	99.5*	90.9	94.4	85.3	102.1	105.3	107.3	120.0
08	89.1	77.0	76.1	93.8	101.9	95.0	92.7	88.7	105.6	102.5	104.1*	121.8*
09	87.3	76.8	76.3	94.8	100.9	92.7	90.3	91.2	100.6*	101.0	101.5	121.8*
10	89.5	78.1	76.3	94.0	97.8	101.1	89.2	90.1	100.9	100.2	99.2	127.2
11	86.4	80.7	75.7	99.8*	95.4	100.8*	92.6	91.1	101.7*	99.6	102.9	128.0*
12	85.4	82.1	75.5	100.0	91.1	102.2	92.6	91.5*	107.5*	101.3	103.5	130.6*
13	87.4	82.3	75.1	101.8*	89.7	105.5	92.9	91.1	108.1*	102.9	107.8	134.6
14	91.2	80.6	76.6	102.4	86.8	113.3*	92.3	91.5	113.7	102.6	108.9*	146.3
15	93.6	80.4	78.8	101.3	85.0	117.81	93.7	92.0*	112.4	100.4	112.6*	143.5
16	98.2	81.3	80.9	102.7	83.5	111.1	95.0	93.4*	121.8*	101.0	114.1*	147.6
17	96.7	81.8	81.5	101.2	84.0	106.0	96.8	92.2	116.4*	106.2	117.4	145.5
18	98.5	82.9	82.5	100.4	82.4	106.5	100.0	90.2	110.9	112.5	116.1	145.3
19	100.1	82.4	85.1	99.0	82.7	100.4	106.6	88.4	114.2	109.0	116.1*	138.5
20	99.8	81.1	93.8	101.2	84.9	95.6	112.2	86.9	112.7	106.5	116.3*	134.9
21	99.9	82.6	95.6	96.6	83.0	89.3	115.3	90.7	111.6	104.7	117.5*	127.6
22	101.0	87.1	102.6*	94.4*	81.3	88.2	117.8	88.1	104.5	102.5	117.6	120.1
23	94.9	87.5	115.6	91.8	80.4	87.0	115.1	88.2	104.7	100.2	120.9*	111.5
24	98.5	89.1	115.0	89.6	80.3	87.1	109.4	89.9	102.2	99.6	123.0*	105.6
25	96.8	86.3	114.9	89.9	77.9	92.3	104.9	96.2*	94.9	96.4	128.5*	106.7
26	92.3	84.3	109.8*	87.3	76.4	96.9	101.3	96.8*	93.5	96.7	127.5*	103.8
27	87.5	78.9	105.4	85.1	80.2	105.9	94.9	101.4	101.6	96.3	128.0*	101.9
28	85.1	79.2	102.5	81.3	82.3	106.2	92.3	102.5	103.0	97.1	129.8	101.6
29	79.3	76.6	97.3	79.9	83.5	102.7	90.7	101.4	99.1	103.3	131.7	102.1
30	77.9	75.9H	94.0	78.5	81.9	104.2	89.1	99.2	100.1		128.3	104.8
31	77.3		91.9	83.2		97.8		99.7	103.1		130.6*	
Mean	69.8	80.4	87.0	92.2	87.0	97.4	99.0	91.5	104.6	102.4	113.8	123.6

\* = corrected for burst in progress; H = measured at Penticton; I = 1700 UT calibration taken at 1915 UT. The yearly mean flux equaled 85.3 in 1987.

付表1 1987年5月から1988年4月までの日々の太陽黒点数と太陽電波束