

# Sq focus 付近における熱的電子のふるまい (K-9M-62号機の結果)

小 山 孝一郎・平 尾 邦 雄

Behavior of Thermal Electrons in E and F Regions near Sq Current focus  
By

Kohichiro OYAMA and Kunio HIRAO

**Abstract:** Electron energy distribution of thermal energy region (0.1 eV ~ 2 eV) was measured in the lower E and F region in 22 January, 1978 near the focus of Sq current system. The measurement showed a remarkable high energy tail enhancement in the midst of the "hot electron layer" which appears at the height of ~105 Km in winter. Rather weak enhancement of high energy tail was also found at the heights of 130 ~ 150 Km. Intense plasma irregularities were detected at these two high energy prevailing heights. Wriggle structures which might be due to vibrational excitation of  $O_2$  were found in the energy range of 0.3 ~ 1 eV at the heights of 118 Km ~ 137 Km.

## 概 要

熱的電子 (0.1 eV ~ 2 eV) のエネルギー分布状態が、特に下部E領域 (高度 100 km ~ 120 km) に注目して観察された。測定は 1978 年 1 月 22 日、午前 11 時に行われ、過去に見出された高電子温度層中の高エネルギー部に存在する過剰電子の存在をはっきりととらえている。電子温度計によって得られた高電子温度層中の電子温度は過去に得られた値のうちで一番高く、これと関係して出現したと思われる第 2 の電子温度のピークが高度 130 ~ 150 km に見出されている。この高度でも、高エネルギー部に過剰な電子が存在している事が二次高調波法によっても確認されている。

測定された電子エネルギー分布には  $O_2$  の振動励起に起因すると思われるギザギザ構造が高度 118 km から 137 km にわたってみられる。

## 1. はじめに

K-9M-45 号機によって、高電子温度層中での熱的電子のエネルギー分布が測定された。高電子温度層中の電子は、マクスウェル分布していない事がみ出された。K-9M-45 号機によるこの結果を確認するために、1978 年 1 月 22 日に K-9M-62 号機による実験が行われた。

K-9M-62 号機に搭載された主なる計測器の目的は；

- (1) 電離層ダイナモ電流によってできる磁場観測
- (2) 電場測定
- (3) 固定バイアスプローブによるプラズマ密度のゆらぎの測定
- (4) 電子密度, 温度の測定
- (5) 熱的電子のエネルギー状態のチェック

であり, 電場測定器を除いたすべての測定器が正常に作動した.

ここでは, 熱的電子のエネルギー分布の測定とこれに関連した電子温度, 電子密度およびプラズマ密度のゆらぎについて述べる.

## 2. プラズマプローブ

熱的電子のエネルギー状態をしらべるために3種のプラズマプローブが使われた. 即ち, DC ラングミュアカーブの二次微分を電氣的に計算する二次高調波法測定器, 電子温度プローブ, および DC ラングミュアプローブである. この実験の目的は, プラズマ中の電子が特にE領域でマクスウェル分布状態にあるかどうかをチェックする事である. DC ラングミュアプローブ特性の二次微分と電子エネルギー分布との関係は

$$F(eV) = [4m_e^{1/2} V^{1/2} S_e N_e] d^2 i / dV^2$$

ここで  $V$  はまわりのプラズマからみたプローブの減速電位,  $e$  と  $m_e$  はそれぞれ電子の電荷と質量で,  $N_e$  は電子密度,  $S_e$  はプローブの表面積である. 二次微分はプローブ電流の二次高調波成分を取る事によって得られる. 測定器は, 1974年および1976年に K-9M-45号機および K-9M-55号機の実験で使われたものとはほとんど同じであるが, 出力を対数圧縮して, すぐにプラズマ中の電子のエネルギー分布状態がわかるようになっている.

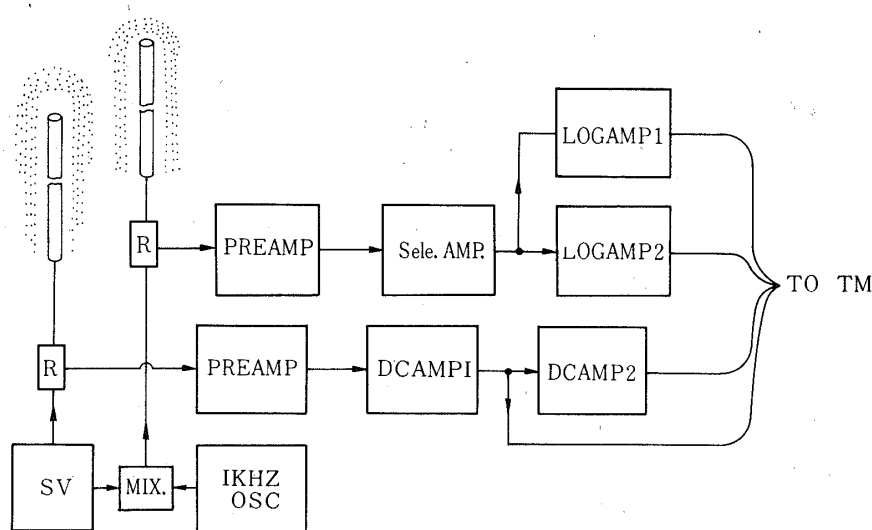


図1 電子エネルギー分布測定装置の Blockdiagram

二次高調波成分 ( $\propto a^2/4 \cdot d^2i/dV^2$ , ここで  $a$  はプローブ掃引電圧に重畳した高周波電圧の振幅) は選択増幅器によって増幅および検波され, 最後に Log-Amp で対数圧縮された. Amp の利得は低感度で  $4.04 \times 10^3$ , 高感度で  $4.2 \times 10^4$  である. 出力信号は従って  $\ln [a^2 d^2i/dV^2]$  に比例している.

二次高調波検出に用いられたと同じ三角波を使って, DCプローブ回路もドライブされた. DC Amp の利得は 195 と 980 で, 二次高調波電圧の出力と DC Amp の出力は, 2つのテレメータチャンネルを使って一秒おきにきりかえて地上へ伝送された.

電子温度プローブ (Hirao et al., 1970) はプローブ展張の時にデータの高度分解能が最もわるく, 約 1 km で, 高度分解能はロケットの上昇速度がおそくなるにつれ, 良くなる. 最終的な測定の精度は, 主にロケットのスピンの信号の変調によって左右されるが, 約  $\pm 50$  K から  $\pm 100$  K である. 円形の平板電極 (直径 100 mm) が頭胴部の最先端に位置する磁場センサの先端にとりつけられた. センサ面はロケットのスピン軸に直角である. センサの前面にはプラズマの流れをさまたげる障害物はなにもない. 電子温度プローブは, プラズマ中の電子がマクスウェル分布状態にない時, 正しい値を与えない事は留意しておくべきである.

### 3. 実 験

直径 3 mm, 長さ 18 cm の円筒プローブが 2 本 (一本は二次高調波法, 一本は DC ラングミュアプローブ用) 使用された. 発射後 51 秒に, まず電極をつつんでいるガラス管が割られ, 次に 53 秒 (高度 79 km) において, 電極はロケットスピン軸に直角に展張され, プラズマ中に浸された. 地球磁場とロケットのスピン軸とのなす角は, ロケットの歳差運動によってロケットの飛しょう中  $17.5^\circ$  から  $57.5^\circ$  まで変化した. 歳差運動の周期は 114 秒で, 歳差運動の首振り角度は  $20^\circ$  である. 従って, 地球磁場と円筒電極のなす角は  $32.5^\circ$  から  $62.5^\circ$  まで変化した. 電子温度プローブも地球磁場に対しては円筒プローブと同じ角をもつ.

ロケットは, 発射後 305 秒に高度 360 km に達した. スピンレートは開頭時に 1.21 Hz で, 55 秒に電場測定用プローブが展張された時に 1.085 Hz に減少した後, 568 秒 (高度 73.8 km) に大気の Drag によってロケットの姿勢が影響を受けるまで同じスピンレートをたもった.

二次高調波法において掃引プローブ電圧に重畳する高周波電圧の振幅は 70 mV で, 掃引プローブ電圧の掃引は 0 から 2 V, くりかえし周期は 1 秒である. プローブとまわりのプラズマの間にできるソースの非直線性によってえられた歪電流の中から二次高調波成分のみを取出した. 高周波電圧を印加しないもとの三角波電圧はもう一つの円筒プローブに加えられ, DC プローブを駆動している.

図 2 に本実験により得られた Data の一部が示されている.

### 4. 結 果

図 3 には片対数プロットした二次高調波成分の高度分布が示されている. この場合, 二次高調波成分の原点は後述するように, インピーダンスプローブでもとめた電子密度と, 二次高調波法および DC ラングミュアプローブによってもとめた理論的な  $-\frac{a^2}{4} d^2i/dV^2$  値

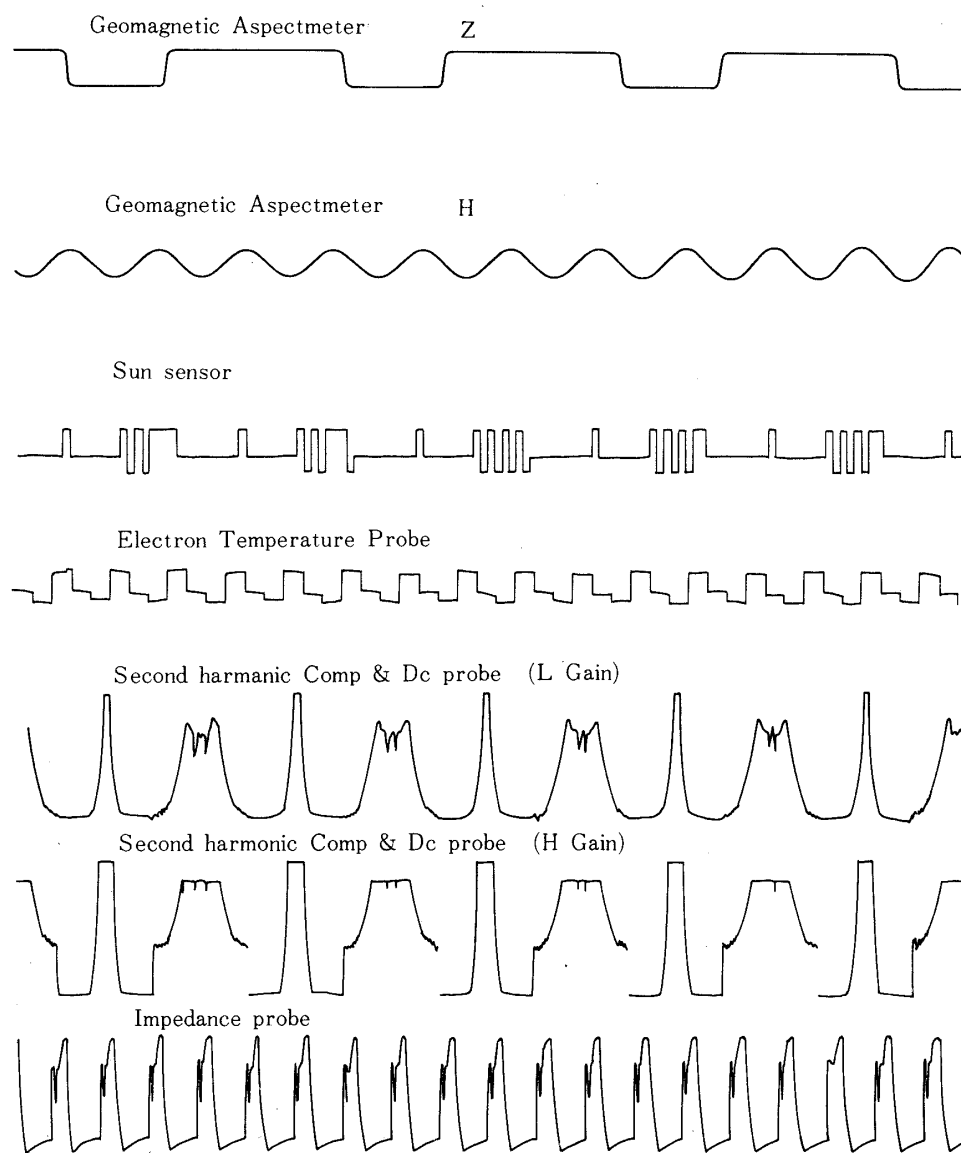


図2 電子温度計，DC ラングミューアプローブ，二次高調波法によって得られた実際の波型の一部．発射後 100 秒．

に，実際にはかった二次高調波成分の高エネルギー領域での直線部を空間電位付近まで延長した値が等しくなった時の電位とした．図 3 b，および 3 c における空間電位付近にみられるでこぼこは，プローブにガードリングがつけられていない事によるとおもわれるが，これについては詳細な地上での実験が必要である．

高度 98.4 km まで片対数プロットのプローブ電流の勾配は徐々に減少し，この事は平均の

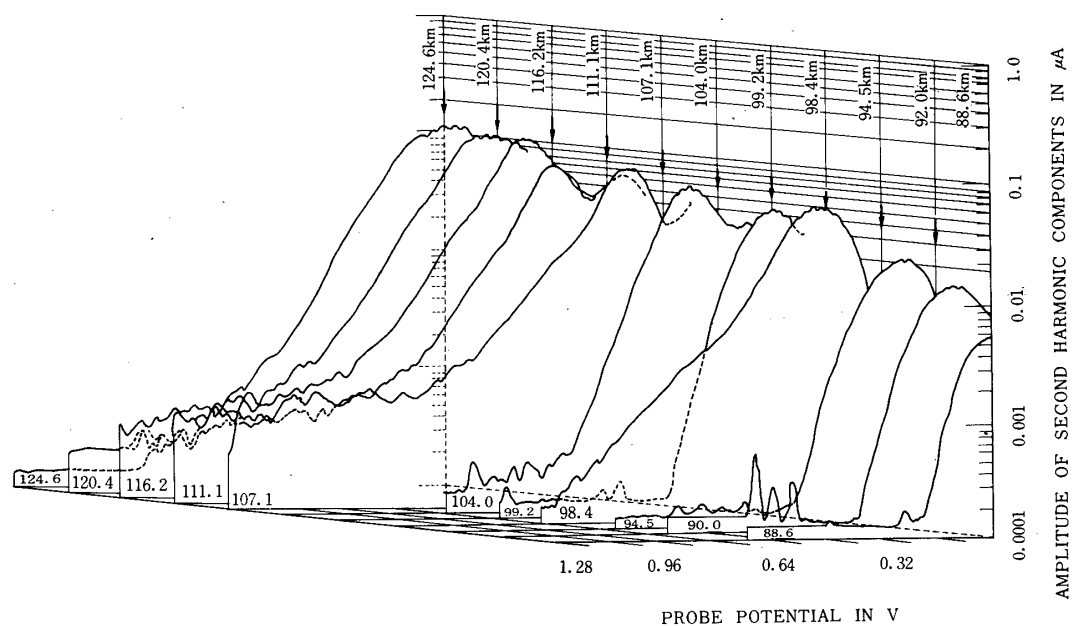


図 3 a 125 km 以下

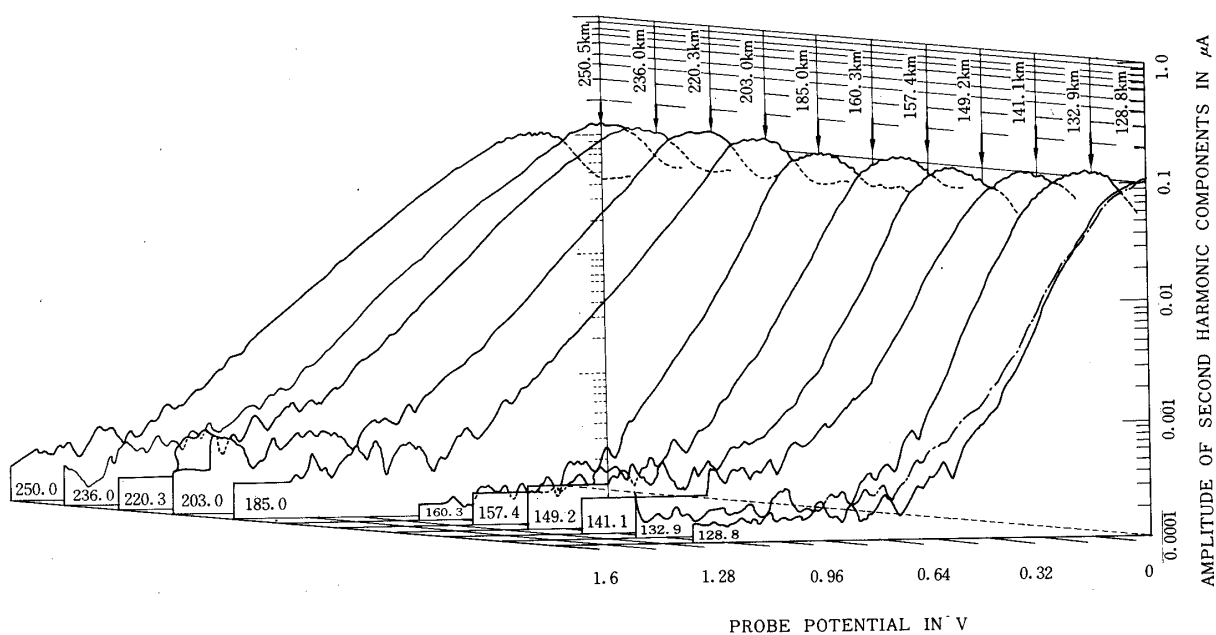


図 3 b 128 km ~ 250 km

128.8 kmでのカーブに重畳してひかれている点線のカーブは図 3 a で示されている 124.6 kmにおけるカーブで、0.6 ~ 0.9 eV によるジグザグ構造は2つのカーブで似ている事に注目されたい。141.1 kmと149.2 kmにおけるカーブに高エネルギー部でのもりあがりが見られる。

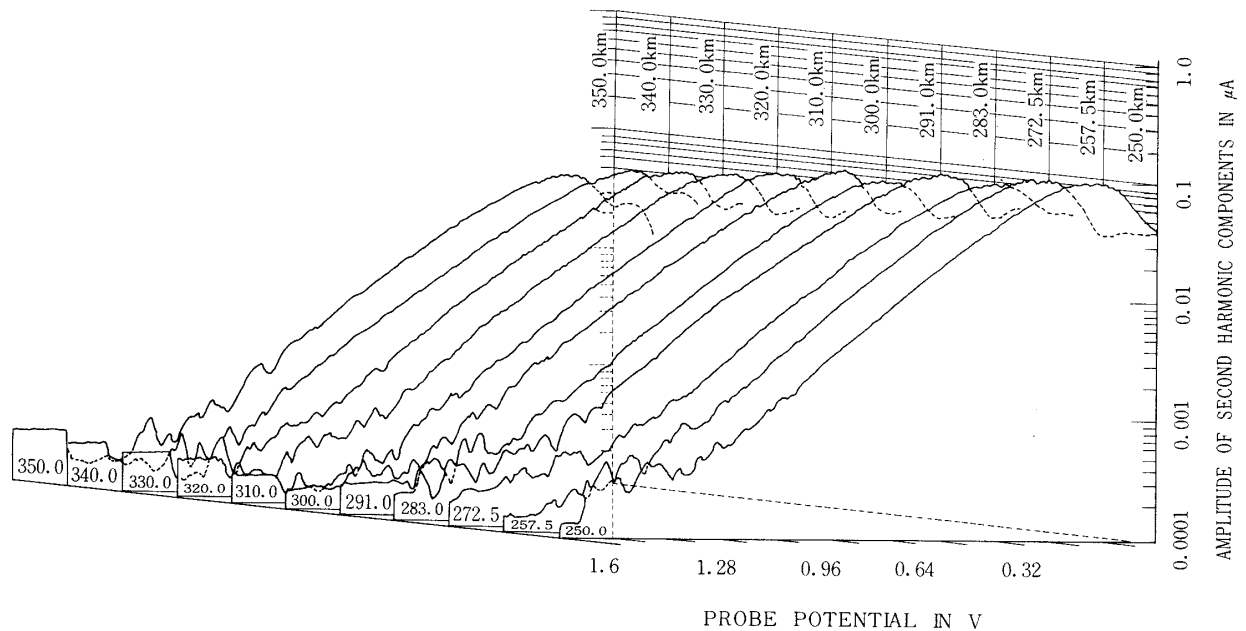


図3c 260 km～350 km

図3 K-9M-62号機によって得られた二次高調波成分の片対数プロット

熱電子エネルギーが徐々に増加してゆく事を意味している。高度 98.4 km における特異なカーブは電子温度プローブでも高い温度を同じ高度で観測しているの、たぶん本当であろう。この高度ではまた、電波研究所のグループによってプラズマ密度のゆらぎが検出されている(高度 105 km におけるほど強くはないが周波数は 8 kHz までのびている)。

103.4 km までプローブ電圧に対する片対数プロットの二次高調波成分はほぼ直線で、高エネルギー部に過剰の電子が存在しているようにはみえない。107.3 km において、カーブの直線部の勾配はより低い高度でのそれよりゆるやかになり、カーブの直線部分はみじかくなり、高エネルギー部での二次高調波プローブ電流がふえる。119 km までは片対数プロットしたカーブの直線性は良くなく、高エネルギー部での二次高調波プローブ電流が強いままである。124.4 km において二次高調波成分の直線からのずれは最も小さくなり(このことはここでプラズマ中の電子がマクスウェル分布状態に近づいたことを意味する)、高エネルギー部のもりあがりは少くなる。この高さは、電子温度プローブによって得られた電子温度が一時減少する高度に一致している。0.5 eV から 1 eV にあらわれているぎざぎざ構造は(128.8 km および 124.4 km)はプラズマ雑音の影響をうけて一見不規則に見えるが、足原氏等(1974)によって計算された電離層中の電子エネルギー分布の中にあらわれる  $O_2$  の振動励起によるギザギザ状構造と対応しているように見える。ここでは典型的な2つのカーブを示したが、これらのギザギザ構造は 118 km 付近からあらわれ 137 km 付近で再び明瞭でなくなっている。これらの微細構造については別な機会で述べる。

ロケットが141.1 km まであがると、片対数プロットされた二次高調波成分で再び高エネルギー部の盛りあがりが見られるようになり、この盛りあがりには149.2 km で最も強くなる。これらの高度においても固定バイアスプローブによってプラズマ波が検出されている。高エネルギー部は高さと共に減少し、219.2 km でほとんどわからなくなる。

ロケットの機体を基準としたプラズマの空間電位とおもわれる電位（ここでは簡単のために二次高調波成分での空間電位付近でのディップ点をとったが、実際にインピーダンスプローブによる電子密度と、二次高調波成分の片対数プロットから得られた電子温度とから求められた空間電位とはずれている。図3の片対数プロットの二次高調波成分の原点は後者の方法によって求められたものである）は電子温度プローブによる電子温度の最大になる約108 km の高度でその最大をとり、124 km で最小となった後、徐々に270 km まで増加する。高度270 km でこの電位の急激な変化が見られるが、この高度は二次高調波法、およびDC ラングミュアプローブから求めた電子温度が明らかに変化している高度と一致しており、この高度でロケットはそれまでとはちがった電離領域へはいった感じをうける。108 km での電位最大は二次高調波法で検出された高エネルギー部の電子によって生じたとみることができよう。

高電子温度層およびその近辺の電子エネルギー分布状態をやや詳しくみるために図4が用意されている。図には高度99.2 km から171 km にわたる代表的な二次高調波成分の片対数プロットが示されている。特性曲線①および②は一つの温度で記述される。一方、特性曲線③④⑤は図中の表に示したように2種の電子群から構成されていると考えられる。③のカーブに対しては電子温度835 K で、この温度をもつ電子の密度を  $3.14 \times 10^4$  ele/cc と1440 K の温度をもつ電子密度を  $1.07 \times 10^5$  ele/cc として二つの電子群をくみあわせると比較的、実測値にあわせることができる。この場合、低い電子温度はDC プローブ特性のセミログプロットから得、高い温度は二次高調波成分のセミログプロットから得た。二つの温度をもつ分布として、一応理論値と実測値が一致するのは0.72 eV までである。④⑤についても同じような手法がほどこされて二つのグループの電子密度、温度が計算された。図中実測曲線に重ねて描かれているのが上記の手法による理論曲線である。高電子温度層中（③④）では、全体の約1/4の電子が低い温度をもち、3/4が高い温度をもっていることが知られる。高度112 km になるとほぼ電子はマクスウェル分布状態に帰る（依然として温度は高く、高エネルギー部は残っている）。

図5には、図3で示された片対数プロットの直線部から得られた電子温度がプロットしてある。電子は、異なった温度をもつ二つのグループから成っていると仮定して測定された二次高調波成分にあうように、二つのグループの電子温度と密度を変えた。図5には、1972年の4月と5月に Millstone の IS レーダーによって観測された中性ガス温度を同時にプロットした (Salah, 1974)。影をつけた部分はこの期間に観測された最大、および最小の温度をカバーしており、この影は同時に、異なった技術によって得られた (in-situ な方法を含めて) 過去のすべての中性ガス温度をふくんでいる。

プラズマ密度の変動は、独立に固定バイアスプローブによって測定された (森他)。ソナグラムによる解析ではロケットの上昇時220 km までプラズマ雑音が観測され、高度108 km

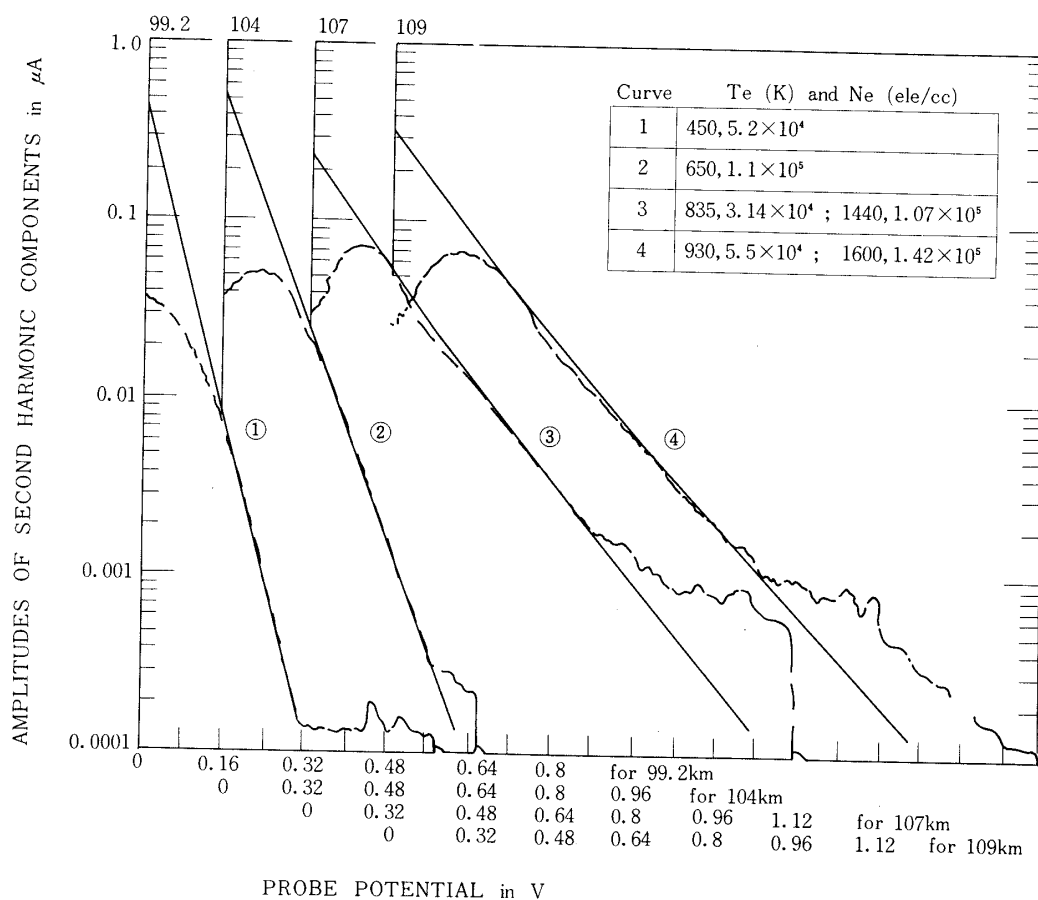


図4 (a) 二次高調波成分における実測値へのカーブフィッティング。実測値に重畳して引かれた線は、図中の表に示されたような温度と密度を仮定して得られた。

付近で最も強く観測された。この高度は、電子温度プローブによって観測された電子温度最大の高度に一致している。

周波数スペクトルの解析によれば、プラズマ密度のゆらぎは高電子温度層の中で 10 kHz まで伸びている。有意なプラズマ密度のゆらぎは、1976 年の夏に行われた K-9M-55 号機による実験では観測されなかった事は留意すべき事である。

プラズマ密度の変動を示唆するものとおもわれる現象は、プローブ電流の二次高調波成分にもみられる。高度 107.3, 115.8 および 119.5 km の片対数プロットした二次高調波成分において高いエネルギーの領域でカーブがふらついているのがみられる。これらのふらつきは高度 124.4, 128.8 および 132.9 km (図3 a と 3 b) で減少し、再び 141.1 km および 149.2 (図3 b) であらわれ、最後に 220 km 付近ではほぼ消滅している。

電子温度プローブは高度 94 km で測定をはじめ、この高度で 750°K を示している。電子温度は 98 km まで上昇をつづけ、高度 105 km で 1160°K に減少し、高度 124 km で最小値



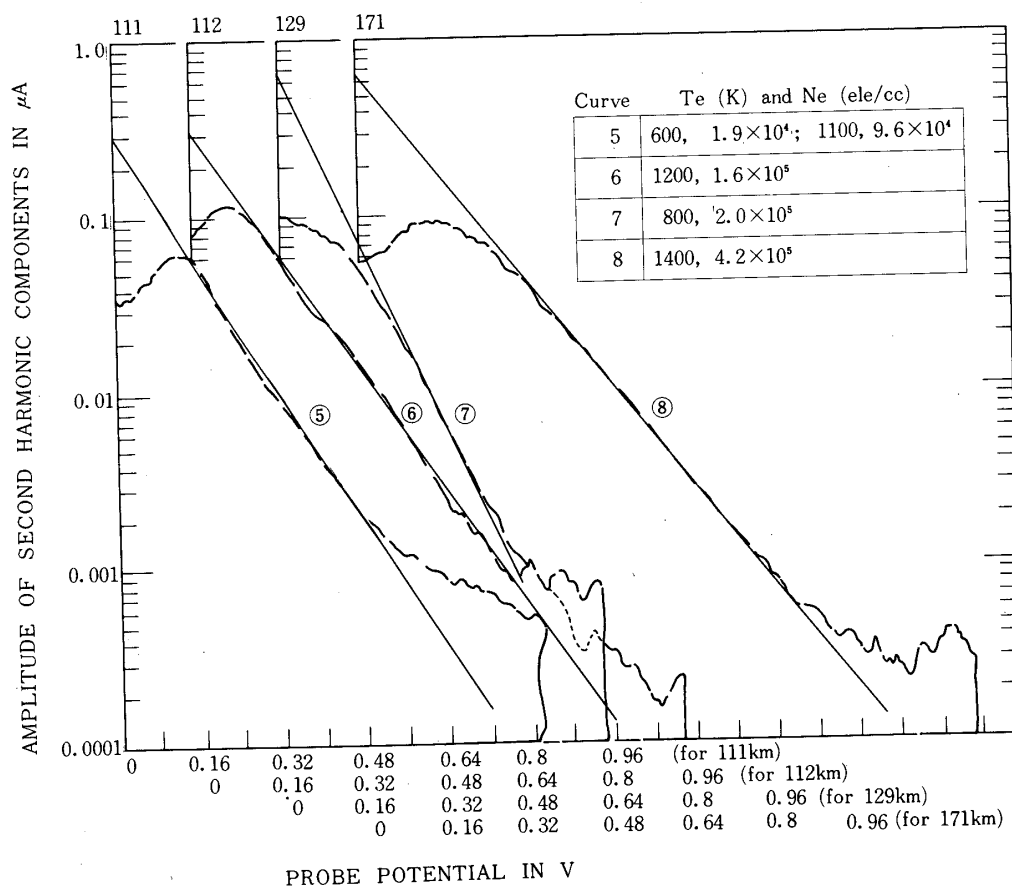


図4(b) 二次高調波成分における実測値へのカーブフィッティング。実測値に重畳して引かれた線は、図中の表に示されたような温度と密度を仮定して得られた。

をとり再び145 kmまで上昇をつづけ、その後約210 kmまで徐々に減少している。今回はじめて得られた、この奇妙な電子温度計による電子温度プロファイルは、二次高調波法による結果とあわせ考えると、電子エネルギー分布の高いエネルギー領域の電子によるものである事を結論する事ができる。

電子密度は、インピーダンスプローブによって得られた。このプロファイルを過去に得られたデータ、および前田教授によって作られたモデルと比較してみると(Maeda, 1971, 1972; Fukao et al., 1975), K-9M-55号機によって得られた電子密度のプロファイルはモデルとよく一致しているようにおもわれる。一方、K-9M-62号機による電子密度( $\chi = 55$ ,  $R_z = 30$ )は中程度の太陽活動度( $\chi = 60$ ,  $R_z = 65$ )のモデルとくらべてもはるかに高い。過去に、冬11時ごろに得られた電子密度のプロファイルは、多かれ少なかれモデルの電子密度より高い。私達は、高度105 km付近にあらわれる高電子温度層と冬期の比較的高い電子密度とを結びつけるに充分な資料を持ち合わせていないが、過去に多くの人々によって、S<sub>q</sub>電流の目玉付近の電子密度の異常さが報告されていることは留意すべき事かもしれない(Ap-

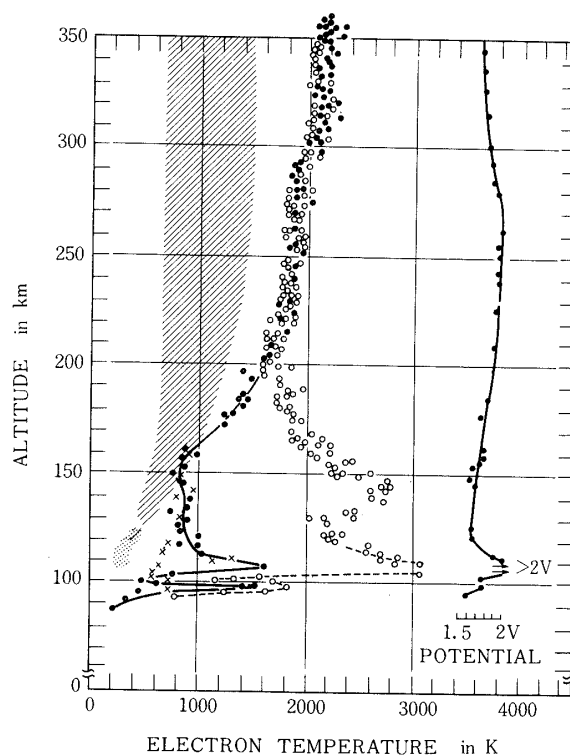


図5 電子温度のまとめ；

●は図3に示された二次高調波法の片対数プロットから得られた。

○は電子温度プローブによる計測。

×はDC ラングミュアプローブの片対数プロットによる結果（DC アンプの利得が低かったため、高いエネルギーの電子温度群の温度は測定できなかった）。

三種の方法による測定は特に高度100～120 kmの高度で違った値を示す。

影をつけた部分はモデル中性ガス温度の変動をあらわし、点々の部分はこの論文の中で述べられた低高度における中性ガス温度の総括である。一番右側のカーブは空電電位とおもわれる電位のプロットである。

pleton 他, 1961 ; Hibberd 他, 1967)。

#### 議論およびまとめ

1974年にK-9M-45号機の実験で発見された高エネルギー領域の電子の enhancement は、より明瞭に今回の実験でたしかめられた。105 km 付近における電子のエネルギー分布の歪は、過去に得られた  $S_q$  focus に関する事柄を考えると、中緯度での磁場方向に流れる電流と密接な関係があるように見える。私達はなにゆえに電子が加熱されるのか、まだ解答をえていないが、いくつかの可能性が考えられる。これらは

(1) 最初の論文で述べたように、局所的な電場が地球磁場にそってできるであろう。この電場はE層では十分に強いであろう。電場の向きは冬半球において電子をE層下部に向っ

て加速する向きである。地磁気データの解析によって得られた電流の向きが、冬から夏半球に向っているとする (Van Sabben, 1966) 事実は上記の電子の向きと相反しない。

(2) N<sub>2</sub> 分子がとびこんできた加速電子によって、振動励起され、プラズマ中の電子は励起された N<sub>2</sub> 分子が再び安定状態へもどる時に放出するエネルギーによって加熱される (Walker, 1968)。もっともこの機構は、最近 Walker 自身によって否定されている。

(3) 局部的に強い 50 mV/m 以上の電場が何らかのメカニズムによって発生し (St-Maurice 他, 1980), St-Maurice らによって提案されたような電子の加熱がおこる。

電子加熱の原因が (1) に仮定されたような磁場方向の電場ではなく、中緯度の特に、S<sub>q</sub> focus 付近にとび込む高速の電子だとすると、加熱が効果的に起こるためには振動励起状態にある N<sub>2</sub> の deexcitation を介するか、あるいは高速電子とまわりのプラズマの相互作用によって効果的に高速電子のエネルギーを熱的電子へ伝達することが必要である。

1982 年の冬に K-9M-72 号機の実験が予定されているがこれには荷電粒子の測定器が搭載されている (1981 年 1 月に予定されていた K-9M-72 号機による実験は 1982 年の冬に延期された)。

## 謝 辞

実験を成功裏に遂行された宇宙工学をはじめとする多くの方々に謝意を表する。また、ここでの議論に使われた電子密度、およびプラズマ中の密度のゆらぎについての情報は本研究所の渡辺勇三氏、および郵政省電波研究所森弘隆、小川敏彦氏により提供された。測定器の設計製作は松栄電子株式会社、久保庄平氏によってなされた。

この研究の一部は著者の一人 (小山) が米国ユタ州立大学滞在中に行われたものであり、物理学科の J. P. St-Maurice 博士、ドイツ Maxplanck 研究所の Kristian Schlegel 博士からの助言に感謝するものである。

中緯度での field Aligned current に興味をもたれて、著者らの研究に関心を示してくださっている、東大理学部 福島直教授にこの場をかりて謝意を表したい。

1980 年 10 月 13 日 新設部 (科学)

## 参 考 文 献

- [1] Appleton, E.V. and A.J. Lyon, Studies of the E-layer of the ionosphere - 11, Electromagnetic perturbations and other anomalies, J. Atmos. Terr. Phys., 21, 73-99, 1961.
- [2] Ashihara, O. and K. Takayanagi, Velocity distribution of ionospheric low-energy electrons, Planet. Space Sci., 22, 1201-1217, 1974.
- [3] Boyd, R.L.F. and N.D. Twiddy, Electron energy distribution in plasmas, I., Proc. Roy. Soc., A250, 53-69, 1959.
- [4] Fukao, S. and K.-I. Maeda, Daytime electron density profiles of the E and F<sub>1</sub> Regions, Space Research XV, 327-333, 1975.
- [5] Hibberd, F.H. and T.L.E. Henderson, S<sub>q</sub> current effects on the seasonal variations in the E-region of the ionosphere, J. Atmos. Terr. Phys., 29, 477-488, 1967.

- [ 6 ] Hirao, K. and K. Oyama, An improved type of electron temperature probe, J. Geomag. Geoelectr., 22, 363-370, 1970.
- [ 7 ] Maeda, K.-I., Study on electron density profile in lower ionosphere, J. Geomag. Geoelectr., 23, 133-157, 1971.
- [ 8 ] Maeda, K.-I., E-region electron density profiles, Space Research XII, 1229-1260, 1972.
- [ 9 ] Mori, H., T. Ogawa and S. Miyazaki, Private Communication, 1978.
- [10] Oya, H. and T. Obayashi, Measurement of ionospheric electron density by a gyro plasma probe: a rocket experiment by a new impedance probe, Rep. Iono. Space Res. Japan, 20, 199-214, 1966.
- [11] Oyama, K.I. and K. Hirao, Evidence of a distorted energy distribution in ionospheric plasma, Planet. Space Sci., 24, 900-904, 1976.
- [12] Oyama, K.I. and K. Hirao, Distortions of the energy distribution of ionospheric thermal electrons near the focus of  $S_q$  current vortex, Planet. Space Sci., 27, 183-192, 1979.
- [13] Oyama, K.I. and K. Hirao, Anomalous heating of the thermal electrons near the focus of  $S_q$  current vortex ( $S_q$  focus anomaly), J. Geomag. Geoelectr., 31, 11-19, 1979.
- [14] Salah, J.E., Daily oscillations of the mid-latitude thermosphere studied by incoherent scatter at Millstone Hill, J. Atmos. Terr. Phys., 36, 1891-1909, 1974.
- [15] St-Maurice, J.P. and Schlegel, K., Anomalous heating of the polar E region by unstable plasma waves, II, Theory, submitted to J. Geophys. Res., 1980.
- [16] Van Sabben, D., Magnetospheric current associated with the N-S asymmetry of  $S_q$ , J. Atmos. Terr., Phys., 28, 965-981, 1966.
- [17] Walker, J.C.G., Electron and nitrogen vibrational temperature in the E region of the ionosphere, Planet. Space Sci., 16, 321-327, 1968.