

S-310-18号機により観測されたE領域プラズマ擾乱

森 弘隆\*・佐川 永一\*・中村 良治・小川 俊雄\*\*

Plasma Disturbances in the E Region Ionosphere  
Observed by S-310-18 Rocket

By

Hiroataka MORI, Eiichi SAGAWA,  
Yoshiharu NAKAMURA and Toshio OGAWA

**Abstract:** A sounding rocket S-310-18 was launched at 11:00 LT on the 26th, January 1988 to find heat sources which may cause the anomalous elevation of the *E* region electron temperature over Uchinoura. We measured plasma and electric field disturbances by a fixed biased Langmuir probe (PWN) and a pair of double probes (AEF), respectively, onboard the rocket. The PWN measured abrupt decrease of the DC current and increase of the AC current (5-160 Hz component) in the altitude range of 94-130 km during the ascending path where the AEF also measured increase of the AC electric field (5-160 Hz component). It is revealed from comparative analysis of the PWN and the AEF data that the potential of the rocket dropped for a few volts probably accompanied by low frequency variations in that altitude range. An other group (TEL) measured an elevated electron temperature in the same altitude range. Coincident occurrence of these phenomena suggests common cause.

---

\* 通信総合研究所

\*\* 高知大学理学部

## 概 要

観測ロケット S-310-18 号機は、内之浦上空の電離層 E 領域に発生する電子温度異常昇温の熱源を解明する目的で、1988 年 1 月 26 日 11:00 LT に発射された。我々は、固定バイアスプローブ(PWN)とダブルプローブ(AEF)を搭載し、プラズマの密度と電場の擾乱の観測を行った。PWN はロケット上昇時の高度 94~130 km で DC 電流の異常減少と AC 電流(5~160 Hz 成分)の増大を観測し、AEF も AC 電場(5~160 Hz 成分)の増大を観測した。両データの比較解析により、上記の高度範囲でロケット電位が低周波の擾乱を伴いながら数 V 低下したことを示す結果が得られた。他のグループ(TEL)により、同じ高度範囲で電子温度の上昇も観測されたが、その高度特性はロケット電位低下、及び低周波擾乱の発生とよく一致していた。この事実は、これらの現象が共に共通の原因により引き起こされたことを示唆している。

## 1. はじめに

これまでに内之浦で行われたロケット観測の結果、冬季の午前 11 時頃の電離層 E 領域の電子温度が中性大気温度よりも異常に高くなることを見出され、その熱源に関心が持たれていた[1]。一方、電子密度ゆらぎ観測においても、E 領域でしばしばゆらぎ振幅の増大が観測されることから、これらの擾乱をひき起す何らかのエネルギー源がこの領域に存在するものと予想されていた[2][3]。このような経過にもとずいて、今回の S-310-18 号機による観測では、我々は E 層プラズマ擾乱の性質を更に詳しく調べると共に、電子温度異常昇温現象との詳細な比較を行うことにより、両現象の相互関係、及び発生原因を探ることを目的とした。

今回の観測では、我々は球形プローブ 1 個とダブルプローブ 1 対をロケット先端部に搭載し、それぞれ、電子密度ゆらぎ、及び電場ゆらぎの観測を行った。観測は全飛翔期間にわたり正常に行われたが、特にロケット上昇期間中の高度約 94~130 km の範囲において、ロケット電位の大幅な低下と低周波擾乱の発生という注目すべき現象が観測された。一方、同時に搭載された電子温度測定器(TEL)によれば、同じ高度範囲で電子温度の異常昇温が観測されていた[4]。この結果は、これらの現象の間に明らかな因果関係が存在することを示唆していると思われるので、観測データの詳細な比較解析によりその因果関係を解明したい。本文はこの目的のために、ロケット上昇期間中の観測データを用いて、ロケット電位の異常低下と低周波擾乱現象の解析、及び TEL により測定された電子温度特性との比較を行った。

## 2. 観測器

飛翔体により波動を観測する場合、自然に発生する波動とロケットにより励起された波動との区別、及び波動モードの識別が重要な問題である。単一のセンサーにこれらの機能を持たせることは困難であるため、通常、何種類かのセンサーを組み合わせた測定法が用いられる。今回の我々の観測では、図1の左図に示すように、ロケット先端部から中心軸上に約15 cm 突き出した直径50 mmの球形プローブ(PWN)、及びロケット先端部から互いに反対方向に約1.2 m 展張された、ダブルプローブと称される1対の直径40 mmの球形プローブ(AEF)を用いた。右図は、ロケット上部から見た各種のプローブ、センサー類の取り付け位置の角度関係を示している。図2は、測定回路のブロック図である。PWNは、プローブにロケット本体に対して+2.75 Vの一定電圧を印加し、低入力抵抗(10 kΩ)

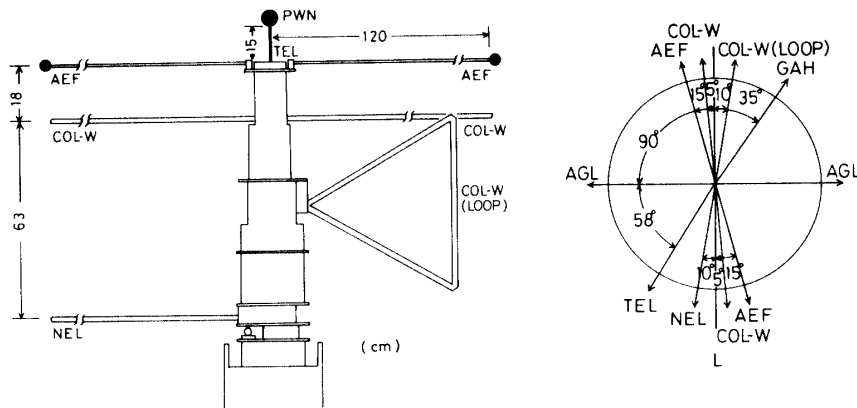


図1 搭載観測器の配置図。左図はプローブ、センサー類のロケット本体への取り付け位置、右図はロケット上部から見た取り付け角度の関係を示す。

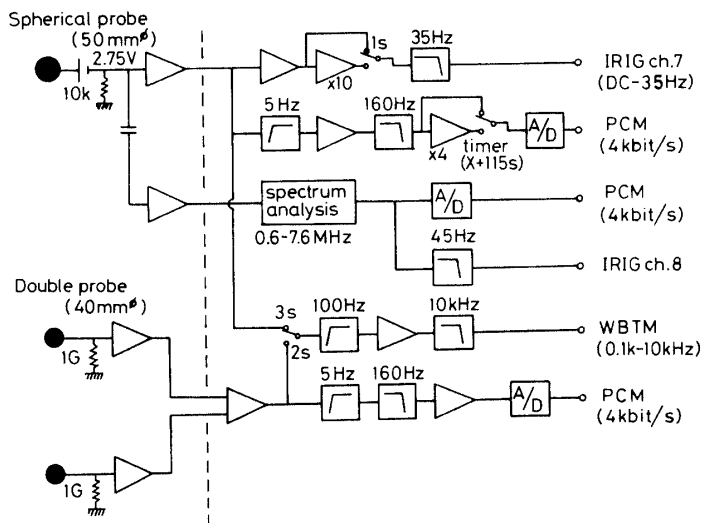


図2 プラズマ擾乱測定器の測定回路のブロック図。

でプローブに流入する電子電流を捕集することにより、プラズマ密度擾乱の測定を行うことを目的としている。一方、AEFの1対のプローブは、各々高入力抵抗(1 G $\Omega$ )でプラズマに対して浮動電位とし、これらのプローブ間の電位差の変動を検出することにより、プラズマ中の電場擾乱の測定を行うことを目的としている。電流プローブに流入する擾乱電流のうち、イオン波領域であるDC~35 Hz成分(PWN-DC)はIRIG ch. 7により、5~160 Hz成分(PWN-LF)はHYB-PCMテレメータにより、また、0.1~10 kHz成分(PWN-WB)は広帯域テレメータにより、それぞれ生波形を伝送する。一方、電子波領域である0.6~7.6 MHz成分(PWN-HF)に関しては、機上で周期0.5秒で周波数掃引型のスペクトル分析を行い、そのスペクトル波形をIRIG ch. 8、及びHYB-PCMテレメータで伝送する。電場プローブによる電場擾乱データに関しては、5~160 Hz成分(AEF-LF)をHYB-PCMテレメータにより、0.1~10 kHz成分(AEF-WB)を広帯域テレメータにより、それぞれ生波形を伝送する。広帯域テレメータは、ロケット上昇期間の発射後220秒まで、電流擾乱データと電場擾乱データが交互に、3秒/2秒の時間率で入力される。各プローブは銅製の球殻で、表面にアクアダック塗装が施されている。また、電場測定用球プローブの中には、プリアンプ部が収納されている。

### 3. 観 測

ロケットは、1988年1月26日11:00 JSTに鹿児島県内之浦町から上下角78°で南南東に向けて発射され、223秒後に最高々度202 kmに達し、430秒後に海上に落下した。当日の太陽黒点数は69、地磁気 $\Sigma k_p$ 指数は15で、太陽活動、地磁気活動共にほぼ静穏であった。また、通信総合研究所山川観測所の11:00 JSTの電離層観測によれば、F2層臨界周波数F<sub>o</sub>F<sub>2</sub>は8.1 MHzで、1月の同時刻の月中央値よりも0.2 MHz低い。スプレッドFなどの不規則構造は見られない。

電流プローブによる電子電流測定は、ロケット発射後45秒(高度55.7 km)のノーズコーン開頭と共に開始した。これに続いて、ダブルプローブは47秒(高度59.0 km)に展開され、観測を開始した。測定は全飛翔期間中正常に行われたが、特に、ロケット上昇期間中に興味深い現象が観測されたので、今回はこれらの現象を中心に解析を行った。

図3は、発射後62.8~116.2秒(高度83.6~149.6 km)の間に取得されたPWN-DC波形、及びPWN-LF、AEF-LF波形とそれらの振幅の二乗平均根の計算結果(RMS)を示している。但し、RMS値は任意スケールで表示されている。この図を見ると、まず、PWN-DC電流が発射後70秒(高度94 km)付近から大きなスピニング周期変動を伴って急激に減少しているのが注目される。電流プローブへの直流印加電圧は、過去のロケット観測の結果を参考に、プラズマ空間電位に対するロケット電位の低下分を考慮して、プローブ電位が常に空間電位よりも高めになるように設定している。この場合には、プローブ電流は周囲の電子密度にほぼ比例して変化することが期待される。事実、相乗り機器のインピーダンスプローブ(NEL)により測定された電子密度[5]と比較すると、図4に示すように、高度94 km付近までは互いに良く合っている。しかし、その後の高度で電子密度は単調に増加しており、特別の密度構造は示していないにもかかわらずプローブ電流が急激に減少し

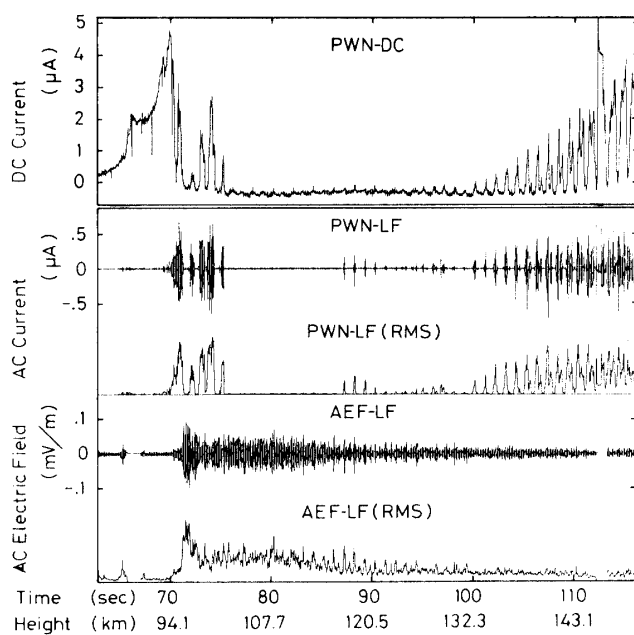


図3 ロケット上昇期間のE層通過中に取得されたPWN-DC波形, 及びPWN-LF, AEF-LF波形とそれらの二乗平均根(RMS). RMS値は任意スケールで表示されている.

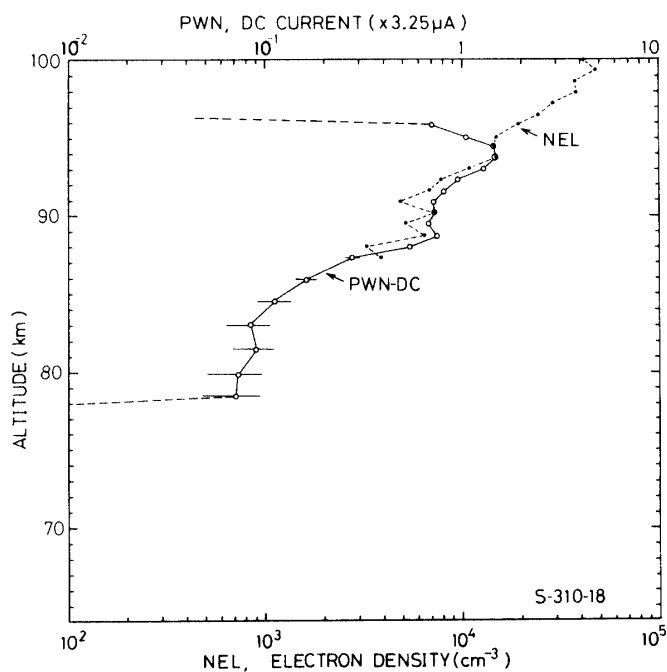


図4 ロケット上昇期間のPWN-DC電流値とインピーダンスプローブにより観測された電子密度 (NEL) [5]との比較.

ているのは、明らかに電子密度の変化によるものではなく、プローブ電位がプラズマ空間電位よりも低下したためと解釈される。このことは、ロケット電位がこの高度で何らかの原因により急激に低下したことを意味している。PWN-DC 波形によれば、プローブ電流の減少は高度 130 km 付近まで続き、その後高度と共に徐々に回復している。

次に、PWN-LF、及び AEF-LF の擾乱強度の高度変化を見ると、やはり高度 94 km 付近から急激に増加していることがわかる。PWN-LF に関しては、プローブ電位が空間電位以下では、次節で述べるようにその電流捕集特性が電位に大きく依存するため、明らかに PWN-DC 波形と同様な大幅な振幅変動が見られる。一方、ダブルプローブによる電場測定法の感度はロケット電位には依存しないので、AEF-LF の波形は実際の電場擾乱の高度分布を示していると考えられる。図 5 は、図 3 の中の 67.8 秒から 78.1 秒までの範囲の PWN-LF、AEF-LF 波形、及びそれらの振幅 (RMS) を拡大表示したものである。これらの図によると、擾乱振幅は PWN-LF の増加よりやや遅れて発射後 71 秒 (高度 95.5 km) 付近から急激に増加し、71.5 秒 (高度 96.0 km) 付近で最大に達した後、73 秒 (高度 98.3 km) 付近で極小になり、以後、78 秒 (高度 105.1 km) 付近のなだらかな極大を経て、徐々に減少している。広帯域テレメータ出力データの FFT 解析の結果によれば、擾乱強度が最大となる高度 96 km から 100 km の範囲に発生した擾乱の周波数スペクトルは、10 kHz にまで達する広帯域の特性を示していた。

#### 4. 解析と考察

3. ではロケット上昇時の高度 94 km 付近からのロケット電位の急激な低下と低周波擾乱現象の発生を示す観測データの概要を述べたが、本節では、これらのデータの解析、及び発生原因に関する考察を行いたい。

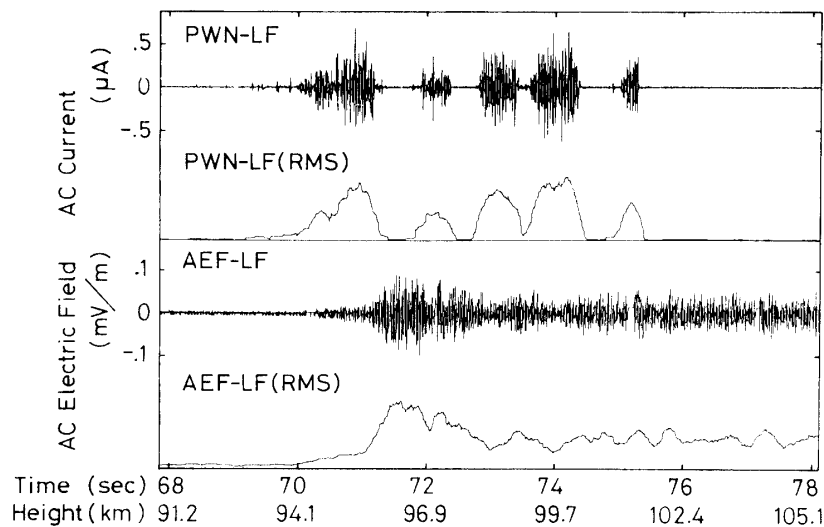


図5 図3の中の、発射後67.8秒から78.1秒の範囲のPWN-LF、AEF-LF波形、及びそれらの振幅(RMS)を拡大表示したもの。

#### 4.1 ロケット電位低下現象

電流プローブは、ロケットに対して常に+2.75 V にバイアスされているので、測定されたプローブ電流値をもとにプラズマに対するプローブ電位が何らかの方法で求められれば、ロケット電位が推定できる。一般に、プローブに流れる電流は周囲のプラズマの密度、温度、及びプラズマに対するプローブ電位に依存し、プローブ固有の電流-電圧特性に従って決定される。これらのうち、電子密度と電子温度は相乗測定器の観測データが利用できるが、電流-電圧特性に関しては、プローブが固定バイアスであったため、実際のものとは得られない。従って、ここでは以下の理論的近似式を用いて、プローブ電位を推定することにする。

まず、プローブの周囲のイオンシース内での粒子間衝突を無視して、軌道運動理論近似を用いる。さらに、ロケット速度はイオンの熱速度と比べて十分速いと仮定して、イオンの熱速度は無視し、イオンは総てロケット速度でロケットの進行方向から流入するものとする。これらの近似のもとで、球形プローブの電流-電圧特性は次式で表わされる。

$$V \geq 0;$$

$$I \simeq I_{i0} \left( 1 - \frac{2eV}{Mv_r^2} \right) - I_{e0} \left( 1 + \frac{eV}{kT_e} \right). \quad (1)$$

$$V < 0;$$

$$I = I_{i0} \left( 1 - \frac{2eV}{Mv_r^2} \right) - I_{e0} \exp\left(\frac{eV}{kT_e}\right). \quad (2)$$

$$\text{但し, } I_{e0} = \pi r_p^2 N_e e \left( \frac{8kT_e}{\pi m} \right)^{1/2}, I_{i0} = \pi r_p^2 N_e e v_r$$

ここで、 $V, I, M, m, N_e, r_p, v_r$  は、それぞれ、プローブ電圧、プローブ電流、イオン質量、電子質量、電子密度、電子温度、プローブ半径、及びロケット速度で、その他の記号は通常の用法に従う。

計算には、イオンの質量数を 30、電子温度を 600 K と仮定し、電子密度、及びロケット速度には実測値を用いた。プローブ電流値は図 3 の PWN-DC に見られるようにスピン周期変動をしているので、これらの上側の包絡線に対して計算を行った。図 6 の左図は、得られた結果である。実際のプローブ電流は、空間電位よりもやや負電位側から正電位側にかけて、理論式で与えられる電流値よりもかなり低めになる傾向があるので、図には電子電流の理論値  $I_e$  のほかに  $0.5 I_e, 0.3 I_e$ 、及び  $0.2 I_e$  を用いた場合の計算も示してある。これらの結果を見ると、ロケット電位は高度 94 km 付近から下がり始め、96.4 km で極小になった後少し回復し、100 km 付近から再び急激に低下し、105 km 付近で最低となり、以後高度と共にゆるやかに回復している。電位の全体の変動幅は 2~3 V と推定される。過去のロケット観測においても、ロケットが E 層を通過するときには電位が低下する傾向がみられたが、今回のような急激で大幅な低下の例は珍しい。これ程に電位が低下した原因について、以下に考察したい。

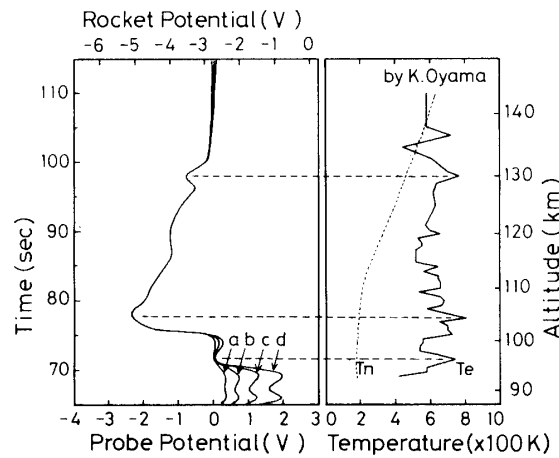


図6 左図は PWN-DC 電流の観測値を基に 4 種類の電子電流値 ( $a: I_e$ ,  $b: 0.5I_e$ ,  $c: 0.3I_e$ ,  $d: 0.2I_e$ ) に対して推定したロケット電位変動の高度分布. 右図は同時に搭載された電子温度測定器 (TEL) により得られた電子温度 [4] の高度分布.

ロケットの電位は, ロケットに流入する電子電流とイオン電流の総和を零とする条件で決定されるので, 上記の理論式 (2) を用いて,  $I=0$  とおくと, ロケット電位  $V$  は次式で与えられる.

$$S_i v_r \left(1 - \frac{2eV}{Mv_r^2}\right) = S_e \left(\frac{8kT_e}{\pi m}\right)^{1/2} \exp\left(\frac{eV}{kT_e}\right) \quad (3)$$

ここで,  $S_i$ ,  $S_e$  はイオン, 及び電子に対するロケット表面の実効捕集面積で, ロケットの形状, 飛翔姿勢等により与えられる. (3) 式によれば, ロケット電位は電子温度に依存して変化することがわかる. 実際に, TEL の測定によると, 図 6 の右図に示すように, 電子温度は高度 94 km 付近から点線で示す中性大気温度 (U. S. 標準大気) よりも 400 K 程度上昇しており, その後の変化も, 左右の図を結ぶ破線で示すように, ロケット電位の変化とよく対応している. しかしながら, (3) 式で  $M=30$ ,  $v_r=1500$  m/s,  $S_i/S_e=0.1$  と仮定して,  $T_e$  を 200 K から 800 K まで変えたときのロケット電位の低下量を計算すると, 0.35 V となり, 左図に示す推定結果にはかなり及ばない. 従って, 実測された電子温度の上昇のみではロケット電位の低下を説明できないことがわかる. 一方, 小山等の K-9 M-62 号ロケットによる電子エネルギー分布測定によれば, E 領域の電子温度異常昇温域においてエネルギー分布がマックスウェル分布からはずれた数 eV の超熱的電子の存在が観測された [6]. もし, TEL で測定される電子温度異常昇温の原因がこれらの超熱的電子であるとすると, 今回の観測においても, 超熱的電子が存在していた可能性が十分考えられる. そこで, 超熱的電子がロケット電位に及ぼす効果について, 以下に検討してみたい.

電子のエネルギー分布として, 簡単のために, 背景の電子の密度, 及び温度を  $N_{e1}$ ,  $T_{e1}$  とし, 超熱的電子の密度, 及び等価温度を  $N_{e2}$ ,  $T_{e2}$  とする 2 電子温度モデルを用いて, 計算を



行った。計算式は、(2)式の右辺の第2項の電子電流成分を次式に書き変えたものになる。

$$I_e = -I_{e1} \exp\left(\frac{eV}{kT_{e1}}\right) - I_{e2} \exp\left(\frac{eV}{kT_{e2}}\right) \quad (4)$$

$$\text{但し, } I_{e1} = \pi r_p^2 N_{e1} e \left(\frac{8kT_{e1}}{\pi m}\right)^{1/2}, \quad I_{e2} = \pi r_p^2 N_{e2} e \left(\frac{8kT_{e2}}{\pi m}\right)^{1/2}$$

$$N_e = N_{e1} + N_{e2}.$$

図7は、 $T_{e1}=600\text{ K}$ 、 $S_i/S_e=0.1$ として、5000 Kから20000 Kまでの4種類の $T_{e2}$ に対して、 $N_{e2}/N_{e1}$ とロケット電位との関係を計算した例である。この結果によれば、例えば1~2 eV (等価温度1~2万度)の超熱的電子が全体の1~2%存在すれば、ロケット電位は2~4 V低下し得ることが予想される。残念ながら、今回の観測では電子エネルギー測定器は搭載されていなかったため、超熱的電子が実際にどの程度存在していたかは不明である。今後の観測を期待したい。

ロケット電位変動の原因を探る上で、上記の平均的変動と共に、顕著なスピン周期変動についても関心が持たれる。図8は、例として、発射後70.4~76.9秒(高度94.6~103.6

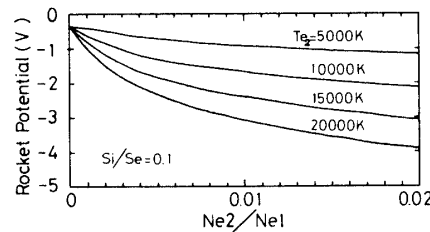


図7 超熱的電子がロケット電位に与える効果の計算例。横軸は超熱的電子の密度 $N_{e2}$ と背景の熱的電子の密度 $N_{e1}$ との比。

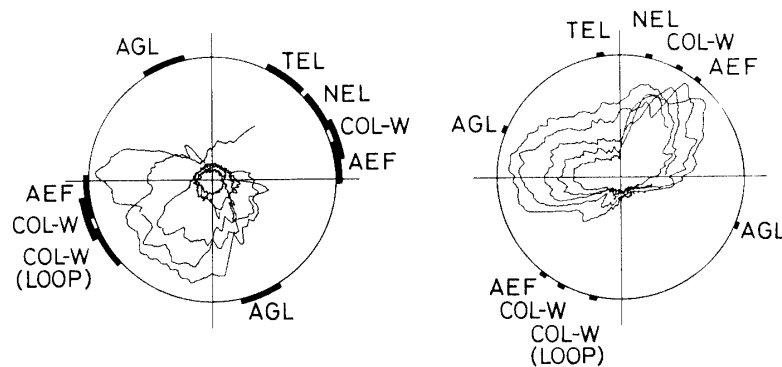


図8 発射後70.4~76.9秒(左図)、及び107.2~112.4秒(右図)のPWN-DC電流測定値のスピン位相極座標表示。各々の時間内に各種のセンサーがロケット進行方向を向いたスピン位相の範囲を太線で表示してある。

km), 及び 107.2~112.4秒 (高度 140.3~145.7 km) の期間の PWN-DC 電流を, スピン位相で回転する極座標表示で表わしたものである. 図の垂直軸は, 磁場センサー GAH (地球磁場のロケット軸と垂直面内成分を測定する) が磁北を向くスピン位相に取り, 反時計回りに時間を進行させている. 電流のスピン位相による増減は, ロケット電位の高低変動によって生じていると考えられる. ロケット電位がスピン位相により変化する原因としては, ロケット壁面の電気的特性の不均一や, 周囲に取り付けられたアンテナ, センサー類の影響で, イオン, 及び電子電流の実効捕集面積  $S_i$ ,  $S_e$  がスピン位相特性を持つためであろう. その具体的な原因を探る試みとして, 図中に, 各種のセンサーがロケット進行方向へ向いたときのスピン位相を合わせて表示した. もし, ロケットの進行方向から流入するイオン電流がセンサー類に妨げられて減少すれば, ロケット電位は低下し, PWN-DC 電流が減少することが期待される. 図によると, あまり明瞭とは言えないが, 左図ではロケット先端部に取り付けられた TEL の円板センサーが, 右図では側面に取り付けられた COL-W のループアンテナが, 電位変動にかかわりがありそうに思われる.

#### 4.2 低周波擾乱現象

3. で述べたように, ロケット上昇時のロケット電位が急激に低下した高度 94 km 付近から, 電流プローブと電場プローブは共に低周波擾乱振幅の増大を観測した. 電場プローブによる擾乱振幅増大の高度特性は, 4.1 で計算したロケット電位低下の高度特性とよく対応している. このことから, 低周波擾乱の発生はロケット電位の低下と何らかの密接な関係があると推定される. 以下では, 両プローブによる擾乱の観測データを詳しく比較し, これに基づいて, これらの擾乱をひき起した原因について考察することにする.

図 9 は, 高度 100 km 付近の 0.6 秒間の PWN-LF, 及び AEF-LF の出力波形である. 両波形を比較すると, それらの形状のみならず, 変動の位相まで互いによく一致していることが注目される. これらの関係は, 1 スピン周期 (1.02 秒) 以上にわたり変わらない.

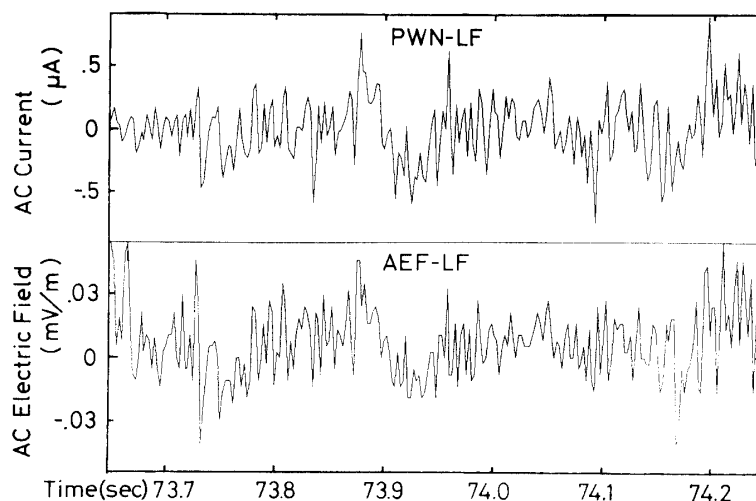


図 9 高度 100 km 付近の 0.6 秒間の PWN-LF, 及び AEF-LF の出力波形.

さらに上空の高度 130 km 以上においても、両波形の間に同じ性質がみられる。これらの性質をもとに、擾乱の発生原因を推測してみたい。まず、この擾乱が見かけ上密度ゆらぎと電場ゆらぎを伴っていることから、自然に発生している静電的波動であると仮定してみる。擾乱の周波数は、問題の高度範囲ではイオン波領域の波動になるので、簡単のために地球磁場の効果を見捨ると、その密度変動成分の振幅  $N_1$  と電場変動成分の振幅  $E \equiv |\mathbf{E}|$  との間には、次のボルツマンの関係式が成り立つものと考えられる。

$$\frac{N_1}{N_0} = i \frac{e\lambda}{2\pi k T_e} E \quad (5)$$

但し、 $N_0$ 、及び  $\lambda$  は、それぞれ背景のプラズマの密度、及び波の波長である。図 9 の PWN-LF の振幅を、同じ高度の PWN-DC 電流値と比較して  $N_1/N_0$  の観測値を見積ると、数%程度になる。一方、波長  $\lambda$  に関しては、波の速度に比べてロケット速度は十分速いと仮定して、単純にロケット速度を擾乱の観測周波数で割ると数 10~数 100 m となるので、これらの値を(5)式に代入して電場の振幅  $E$  を見積もると、数 10~数 100  $\mu\text{V}/\text{m}$  という結果が得られる。この値は電場プローブで検出可能な大きさであり、実際に観測された AEF-LF の振幅はこの範囲にある。従って、振幅の関係からは、両プローブがイオン波領域の静電波動を観測したと考えても矛盾はない。それでは位相の関係はどうであろうか。電場プローブは 1 対のプローブがロケット軸のまわりをスピン周期で回転しながら電場測定をしているので、もし自然に発生している静電波動の電場成分を観測したとすると、電流プローブによる密度変動成分の測定波形とは、その位相関係が 1/2 スピン周期毎に  $180^\circ$  逆転することが期待される。ところが、実際には図 9 に示される様に、両波形の位相は常にほぼ同相で、1/2 スピン周期毎の逆転は生じない。これらの結果を考え合わせると、両プローブの観測した波形は自然の波動そのものではなく、むしろロケットにより作られた擾乱の可能性が高いと思われる。

図 10 は、前図に続く 0.6 秒間の波形である。但し、AEF-LF の縦軸のスケールは前図の 0.2 倍に縮小してある。図中の矢印で示す時刻にロケット電位が急激に低下したため、電流プローブは、それ以後擾乱波形がほとんど観測できなくなった。PWN-LF 波形に見られる矢印の時刻以後の大きな変動は、電流が急激に減少したことによる PWN-LF 測定回路の過渡的応答波形である。一方、AEF-LF は測定感度がロケット電位に依存しないので、矢印の時刻以後も擾乱波形が観測されているが、これと合わせて、PWN-LF の過渡的応答波形と同様の変動も重畳されていることがわかる。このことは、ダブルプローブもやはりロケット電位変動を検出し得たことを意味している。その原因としては、プローブ周辺へのロケット電位の浸透、あるいは測定回路のコモンモード特性の不完全などが推測されるが、現在のところ明らかではない。

以上の解析結果をもとに、観測された低周波擾乱の成因を推定してみたい。電流プローブはプラズマの密度変動の測定を目的として、プローブ電位をプラズマ空間電位よりも高めの電子飽和電流領域に設定しているが、今回のようにロケット電位の大幅な低下によりプローブ電位が空間電位以下に低下すると、プローブ電流-電圧特性が(2)式に示すように

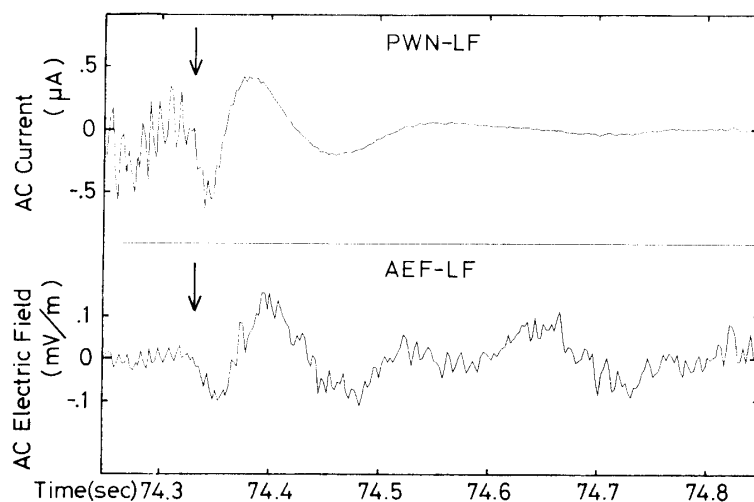


図10 図9に続く0.6秒間の出力波形. 但し, AEF-LFの縦軸のスケールは前図の0.2倍に縮小されている.

指数関数的になり, プローブ電流がロケット電位の変動に敏感になる. 従って, この状態におけるプローブ電流の擾乱は, ロケット電位変動により生じた可能性も考えられる. 一方, 電場プローブも図10からの推論のようにロケット電位の変動をも検出し得たとすると, ロケット電位が変動すると, 電流プローブと電場プローブは共に同じ変動波形を出力することになり, 図9の結果と良く一致する. 実際に, 高度94 km以上でロケット電位が急激に低下したことから, この現象をもたらした周囲のプラズマ, 又は超熱的電子等のゆらぎにより, ロケット電位の変動が低周波帯にまで及んでいた可能性は十分考えられる.

## 5. ま と め

S-310-18号機に搭載された固定バイアスプローブとダブルプローブにより, ロケット上昇時の高度約94~130 kmでロケット電位の大幅な低下と低周波擾乱の増大を観測した.

固定バイアスプローブのデータを解析した結果, 推定されるロケット電位の低下は2~3 V程度で, 顕著なスピン周期変動を伴っていた. 相乗りの電子温度測定器(TEL)により測定された電子温度も, 同じ高度範囲で数100 Kの異常昇温をしていたが, この程度の昇温では推定された大きな電位低下は期待できない. そこで, 過去の観測例に基づいて, 数eVの超熱的電子が存在する場合について理論的検討を行った結果, これらの電子が全体の数%存在すれば, 観測結果に相当する電位低下が生じ得ることが判った.

低周波擾乱現象に関しては, 両プローブの観測データの詳しい比較解析を行った結果, 両データの波形, 及び位相が1スピン周期以上にわたりよく一致していることが判明した. この事実は, 各プローブが自然に発生している波動を直接観測したものと仮定したのでは説明が困難であるが, ロケット自体が自然からの擾乱により電位変動を生じ, この変動を, 各々電流, 及び電場の変動として検出したと考えると容易に理解できる.

ロケット電位の低下，低周波擾乱の増大，及び電子温度の異常昇温が相伴って発生していることは，これらの現象が共通の原因によって引き起こされたことを示唆している。他のロケット実験において，小山等により電子温度異常昇温と共に観測された超熱的電子はその有望な原因の1つと考えられるので，今後更に詳しい相互観測が期待される。

### 謝 辞

S-310-18号機ロケット実験は，宇宙科学研究所の観測計画の一環として実施された。実験主任伊藤富造教授，及び小山孝一郎助教授，並びに関係各位の御尽力に対し，深く感謝します。本研究のために，同時搭載観測器による電子密度，電子温度，及び地磁気観測データの御提供を頂いた。御担当の各位に対し感謝の意を表します。搭載観測器の製作にあたり御世話になった明星電気(株)の担当グループに対し，合わせて感謝します。

### 参 考 文 献

- [1] K. Oyama and K. Hirao: Anomalous Heating of the Thermal Electrons Near the Focus of the Sq Current Vortex (Sq Focus Anomaly), J. Geomag. Geoelectr. **31** (1979), 11.
- [2] 森，小川，宮崎：K-9 M-62による電子密度ゆらぎの観測，昭和53年度宇宙観測シンポジウム(1978)，111.
- [3] Y. Watanabe, H. Amemiya, and Y. Nakamura: Rocket Observation of Electron Density Irregularities in The Lower E Region, J. Geomag. Geoelectr. **42** (1990),19.
- [4] 小山，原，阿部，渡辺，雨宮，奥沢：K-9 M-81/S-310-18号機によるE層熱エネルギー収支に関する総合実験(電子温度の結果)，第85回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会(1989)，I-36.
- [5] 渡辺：E層総合観測実験(S-310-18号機)のインピーダンスプローブ特性，第85回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会(1989)，P-64.
- [6] 小山，平尾：Sq focus付近における熱的電子のふるまい(K-9 M-62号機の結果)，宇宙航空研究所報告(1980)，1255.