

電子密度ゆらぎのロケット観測

渡辺勇三・雨宮 宏*・中村良治

(1988 年 12 月 26 日受理)

Rocket Observation of Electron Density Irregularities in the Lower E Region

By

Yuzo WATANABE, Hiroshi AMEMIYA and Yoshiharu NAKAMURA

Abstract: Local ionospheric density irregularities in the scale size of 3m to 300m were measured during the ascending path from 74 km to 93 km by the fix biased Langmuir probe onboard the S-310-16 sounding rocket. The rocket was launched at 22:40:00 on February 1, 1986 from Kagoshima Space Center in Japan. It is found from frequency analysis of the data that the spectral index of the irregularities is 0.9 to 1.8 and the irregularity amplitude is 1 to 15%. The altitude where the amplitude was maximum was 88 km.

The generation mechanism of these irregularities is explained by the neutral turbulence theory which indicates that the spectral index is $5/3$. The theory has been confirmed by the chemical release experiment using rockets over India and is effective up to about 110 km.

概 要

昭和 61 年 2 月 1 日 22 時 40 分 00 秒に内之浦から打ち上げられた観測ロケット S-310-16 号機に搭載された固定バイアス・ラングミュアプローブによって電離層電子密度の高度分布, および, 波長が 3 m から 300 m の電子密度のゆらぎが高精度で測定された。ロケット上

* 理化学研究所

昇時の高度 74 km から 93 km の領域のゆらぎのデータを周波数解析した結果, ①ゆらぎのスペクトル指数は 0.9~1.8 である, ②ゆらぎの大きさは 1~15 % である, ③ゆらぎの大きさが最大になる高度は 88 km であることがわかった. 今回, 観測された電離層 E 層下部領域の電子密度のゆらぎは中性大気乱流の理論で説明することができる. また, プローブがロケットウェイクの端の領域に近づいた時に観測される大きな電子密度ゆらぎの特性が調べられた結果, ①ロケット上昇時のアンテナ展張直後の低電子密度の領域から現われている, ②ロケット下降時にはプローブが大小二つの連続した複雑なロケットウェイクの影響を受けている, ③降下時の低高度領域では電子密度ゆらぎの信号には特にロケットウェイクの影響が認められない様な時でもその周波数解析の結果にはウェイクでの擾乱の特徴が大きく現われることが明らかとなった. ロケット降下時のプローブ観測の結果から電離層のことを検討するのは危険であることがわかる.

ま え が き

電離層 E 層領域の電子密度ゆらぎのロケット観測は赤道領域及び中低緯度で行なわれてきた. K-9 M-44 号機の観測によると高度 91 km から 113 km の領域でスペクトル指数は 2.2~4.1, 電子密度ゆらぎの大きさは 1~5 %, 密度ゆらぎの大きさは 92~95 km で最大であった. また, この高度領域の電子密度の高度分布は正の高度勾配になっていた. 電離層 E 層領域の電子密度ゆらぎの生成の機構はクロスフィールド不安定と中性大気乱流などの理論で説明されている. クロスフィールド不安定のスペクトル指数の理論値は 3 である. インドでのロケット実験によるとスペクトル指数が 2~4 で, 電子密度ゆらぎの大きさが 1~20 % であり, 電子密度の高度分布に正の高度勾配がある場合に生じることが明らかにされている. K-9 M-44 号機で観測された電子密度ゆらぎはクロスフィールド不安定の理論で説明できるものであるが, 中性大気乱流によって生じる電子密度ゆらぎの可能性について調べる目的で観測ロケット実験が行なわれた. 鹿児島県, 内之浦の実験場から打ち上げられた S-310-16 号機に搭載された固定バイアス・ラングミュアプローブによって電離層電子密度の高度分布および波長が 3 m から 300 m の電子密度のゆらぎの測定が試みられた.

I. S-310-16 号機による観測

昭和 61 年 2 月 1 日 22 時 40 分 00 秒 (JST) に鹿児島宇宙空間観測所から打ち上げられた S-310-16 号機は発射ドーム (31.2°N, 131.1°E) を発射後, 223.1 秒後に最高々度, 200.6 km, 海上距離 105.8 km の位置 (30.3°N, 131.4°E) を通過し, 445 秒後に内之浦南東 239.8 km の海面上 (29.4°N, 132.3°E) に落下着水した.

S-310-16 NEL BLOCK-DIAGRAM

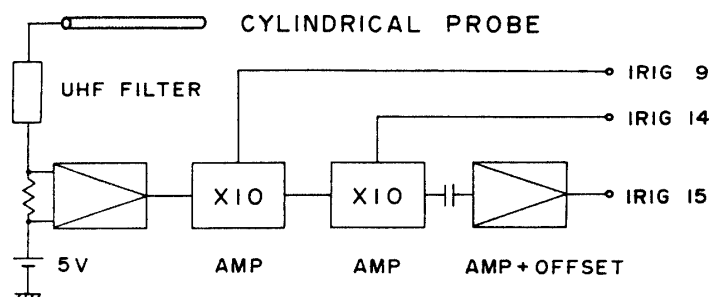


図1 測定装置のブロックダイアグラム：電離層の電子密度と密度ゆらぎを観測するために固定バイアス・ラングミュアプローブが搭載された。プローブは長さ約1m 直径約1cmの円筒形プローブが用いられた。

電離層電子密度の測定のために固定バイアス・ラングミュアプローブが搭載された。センサーはロケットから電離層プラズマ中に突き出した金属 BeCu 製プローブ(長さ1m, 直径10mm)である。これに固定バイアス電圧(+5V)を印加してプローブに流入する飽和電子電流値およびその交流成分を測定することによって電離層電子密度[1]及び電子密度ゆらぎの観測を行なった。第1図は測定装置のブロックダイアグラムである。電子密度ゆらぎの信号はFM テレメーターの IRIG 15 チャンネルで伝送された。発射46秒後のテレメーターチャンネル切り換えに続いて47秒にアンテナ伸展を行ない、約60秒～約385秒の区間で計測が行なわれた。

電離層のE層は昇りの100.3km(75秒)から119.7km(90秒)の間及び降りの114.7km(360秒)から101.6km(370秒)の区間に観測され、最大電子密度は $2\sim 3\times 10^4$ (1/cc)で複層構造を示した[2]。また、EF-Valleyが125kmから170kmの高度領域に観測された。その最小電子密度は上昇時に 6×10^3 (1/cc)で、降下時には 3×10^3 (1/cc)であった。ロケットの降下時の測定値にはウェイクの影響が現れてスピン変調を受けた。また、ロケットウェイクの影響で降下時の測定値が上昇時よりわずかに小さくなった。

II. 電離層電子密度のゆらぎの観測

第2図はロケット上昇時に観測された生データで上段は直流電流高利得信号、中段は直流電流低利得信号、下段は電子密度ゆらぎの信号である。発射後47秒でプローブ展張し、58秒頃から電子密度ゆらぎが出る。約90kmで上段の高利得信号は飽和し始めている。直流電流低利得信号はやがてE層領域の多層構造を観測し、E-F領域を経て最高々度領域の観測を行っている。第3図は47秒のプローブ展張時の電子密度のゆらぎのチャンネルの信号である。約47.26秒にプローブ展張が始まり、続いて振動に基づく周期的なノイズが出ている。プローブ展張前も振動の終了後も信号はきれいで他のノイズは乗っていない。電子密度ゆらぎのチャンネルの信号の周波数解析は47秒～71秒、340秒～360秒、及び、370

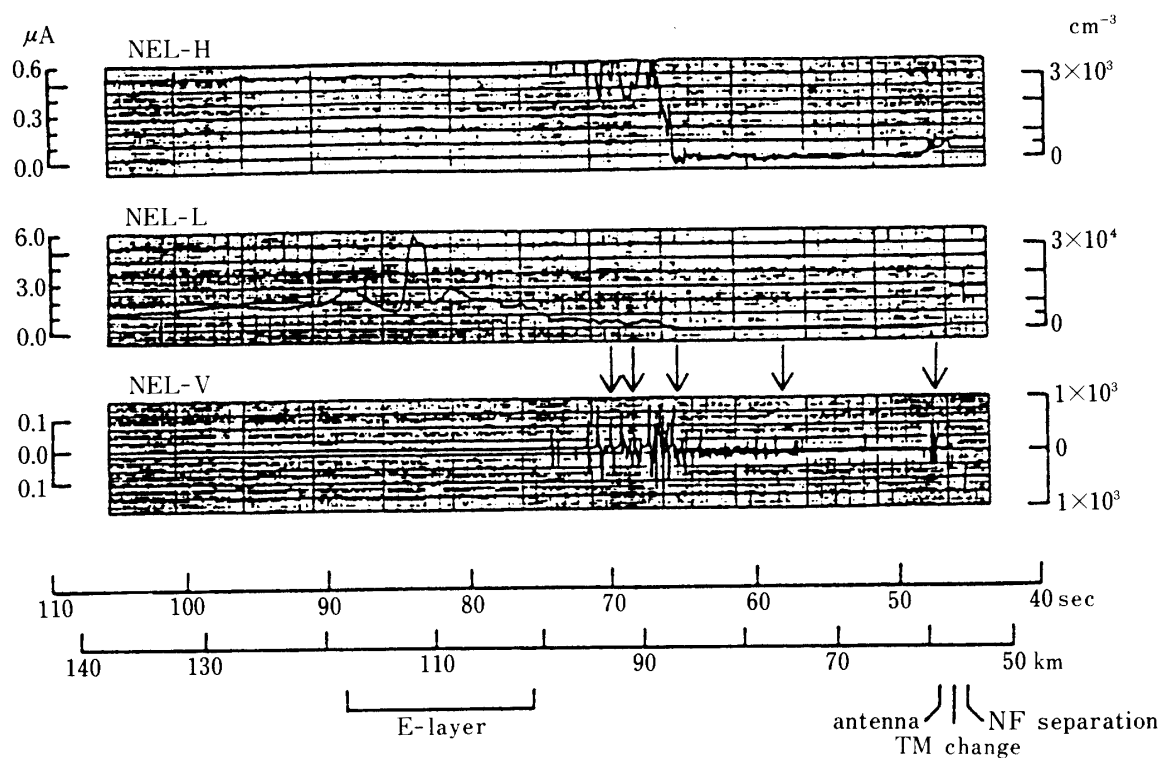


図2 ロケット上昇時の観測データ：上段は直流電流の高利得の信号，中段は直流電流低利得の信号，下段は電子密度ゆらぎの時間変化である．47秒でプローブ展張，58秒頃から電子密度ゆらぎが見える．

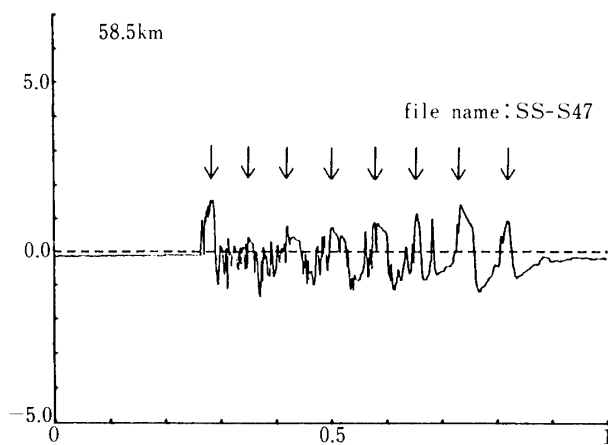


図3 47秒のプローブ展張時のデータ：約47.26秒にプローブ展張が始まり，続いて振動に基づく周期的ノイズが出ている．プローブ展張前も振動の終了後も信号はきれいで他のノイズは乗っていない．

秒～385秒で試みられた。その結果、得られた周波数スペクトルの横軸の周波数は密度ゆらぎの伝搬速度がロケットの速度に比べて十分に小さい場合にはロケット速度を用いて電子密度ゆらぎの波長に交換することができる[3]。それ故、電子密度ゆらぎの波数 k は観測されたゆらぎの周波数に比例する。電子密度ゆらぎの特性を調べるために密度ゆらぎのスペクトル指数を求める。ゆらぎのスペクトル指数の値、 Z は下記の第二式の対数プロットの傾斜から得ることができる。

$$[n_i^2] = \int N(k) dk \quad (1)$$

$$N(k) \propto k^{-Z} \quad (2)$$

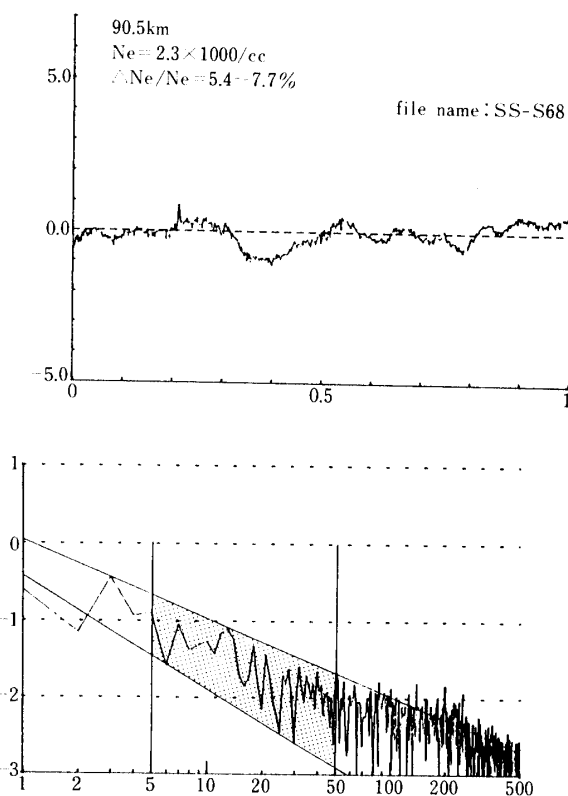


図4 68秒の電子密度ゆらぎのデータと周波数解析の結果：上段はFMテレメーターIRIG・15チャンネルの信号で密度ゆらぎが観測されている。下段は周波数解析の結果で勾配からスペクトル指数が求められる。ロケットの速度が電子密度ゆらぎの伝搬速度より十分大きい時、横軸の周波数は電子密度ゆらぎの波長あるいは波数に変換される。高度は96.5km、電子密度は2300/cc、 $\Delta Ne/Ne$ すなわち電子密度ゆらぎの大きさは5.4～7.7%、スペクトル指数は1.0～1.4である。

Ⅲ. 密度ゆらぎの解析結果

Ⅲ-1 解析結果-1

① ロケット上昇時の68秒の解析結果

第4図は68秒，高度90.5 km，の電子密度ゆらぎのデータ（上段）と周波数解析の結果（下段）である．上段のFM テレメーター IRIG-15 チャンネルの信号に密度ゆらぎが観測されているのがわかる．密度ゆらぎの大きさと背景の電子密度の比，すなわち， $\Delta Ne/Ne$ の値は5.4～7.7%である．ロケットの上昇時の電子密度ゆらぎの大きさは1～15%であった．下段の周波数解析の結果の勾配から得られたスペクトル指数の値は1.0～1.4である．直流プローブで測定する場合プローブ表面の汚れの影響を考慮に入れる必要があるがその定量的評価が困難であることから定性的な検討を試みる．プローブ表面の汚れのために周波数解析で得られたスペクトルの高周波数領域で入力が多い目になるのをこれを考慮

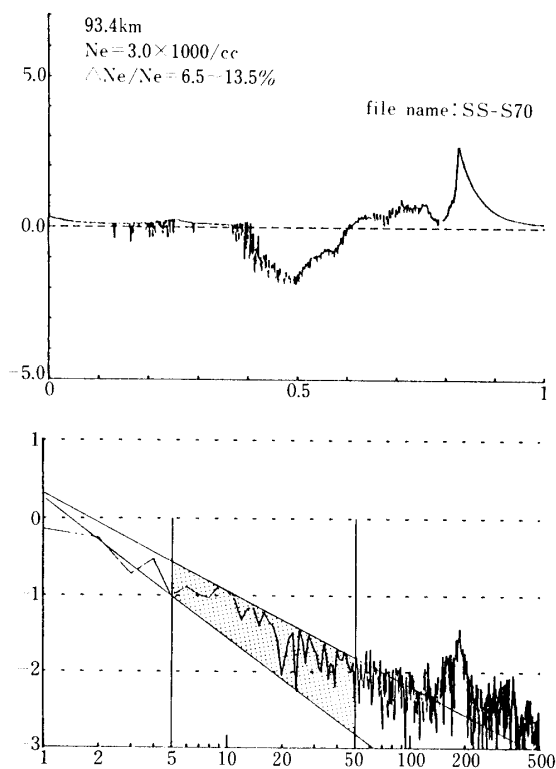


図5 70秒の電子密度ゆらぎのデータと周波数解析の結果：上段の結果からプローブがロケットウェイクの端領域に近づく時に大きな電子密度ゆらぎが観測されるのがわかる．この時，下段の周波数解析の結果の200 Hz付近に大きな山状の盛り上がりが見られている．さらに詳細に見ると第2高調波の位置に二つ目のピークが出ているのがわかる．高度は93.4 km，電子密度は $3 \times 10^3/cc$ ，密度ゆらぎの大きさは $\sim 13.5\%$ ，スペクトル指数は1.2～1.8である．

に入れると勾配は少し大きくなってスペクトル指数の値も少し大き目になる。

② ロケット上昇時の70秒の解析結果

第5図は70秒、高度は93.4 km、背景の電子密度が $3 \times 10^3/\text{cc}$ のところでの密度ゆらぎのデータと周波数解析の結果である。上段の結果からプローブがロケットウェイクの端領域に近づいた時に大きな電子密度ゆらぎが観測されるのがわかる。密度ゆらぎの大きさは $\sim 13.5\%$ に至っている。この時、下段の周波数解析の結果の200 Hz付近に大きな山状の盛り上がりが見えている。さらに詳細に見ると第2高調周波の位置に二つ目のピークが出ているのがわかる。密度ゆらぎの波長15 m \sim 400 mの領域のスペクトル指数は1.2 \sim 1.8である。

③ ロケット下降時の346秒の解析結果

第6図は346秒の電子密度ゆらぎのデータと周波数解析の結果である。上段の図からプ

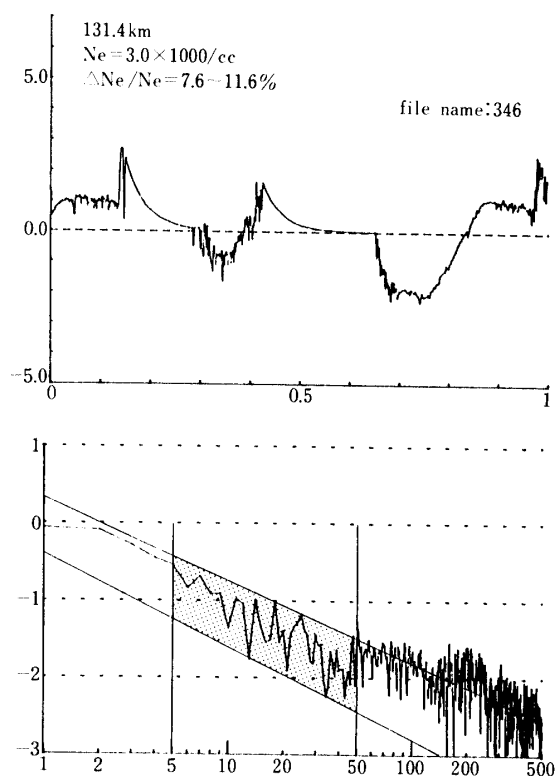


図6 346秒の電子密度ゆらぎのデータと周波数解析の結果：上段の図からプローブが大小二つの連続したロケットウェイクの影響を受けていることがわかる。下段の周波数解析の結果200 Hz以上には大きな山状のノイズが現れている。ロケット降下時の観測結果で高度は131.4 km、電子密度は $3 \times 10^3/\text{cc}$ 、密度ゆらぎの大きさは $\sim 11.6\%$ で、スペクトル指数は明らかにロケットウェイクの影響が大きく出ていると解釈して求めない。

ローブが大小二つの連続したロケットウェイクの影響を複雑に受けていることがわかる。下段の周波数解析の結果の 200 Hz 以上には大きな山状のノイズが現れている。ロケット降下時の観測結果にはこのような 200 Hz 以上のノイズが連続して現われる。この観測の高度は 131.4 km, 電子密度は $3 \times 10^3/\text{cc}$, 密度ゆらぎの大きさは $\sim 11.6\%$ であった。この高度領域はいわゆる E-F Valley の底の部分である。ロケットウェイクの影響が大きく出ているのでスペクトル指数の値は算出しなかったがほぼ同じようであった。

④ ロケット下降時の 382 秒の解析結果

第 7 図は 382 秒の電子密度ゆらぎのデータと周波数解析の結果である。上段の電子密度ゆらぎの信号を見ると特にロケットウェイクの影響が出ている様には見えないが、下の周波数解析の結果の 200 Hz 付近には大きな山状の盛り上がりが見えている。ロケット降下時のプローブ観測の結果から電離層のことを厳密に検討する場合には注意が必要であるこ

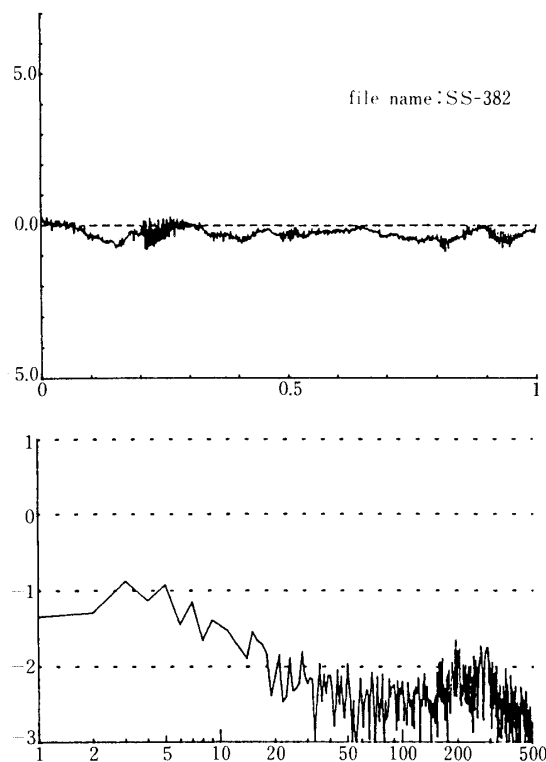


図 7 382 秒の電子密度ゆらぎのデータと周波数解析の結果：上段の電子密度ゆらぎの信号を見ると特にロケットウェイクの影響が出ている様には思わないが、下段の周波数解析の結果の 200 Hz 付近には大きな山状の盛り上がりが見えている。ロケット降下時のプローブ観測の結果から電離層のことを検討するのは危険であることがわかる。高度は 84.7 km, 電子密度は約 $110/\text{cc}$, 密度ゆらぎの大きさは $\sim 15\%$ で、スペクトル指数は上記の理由で求めない。

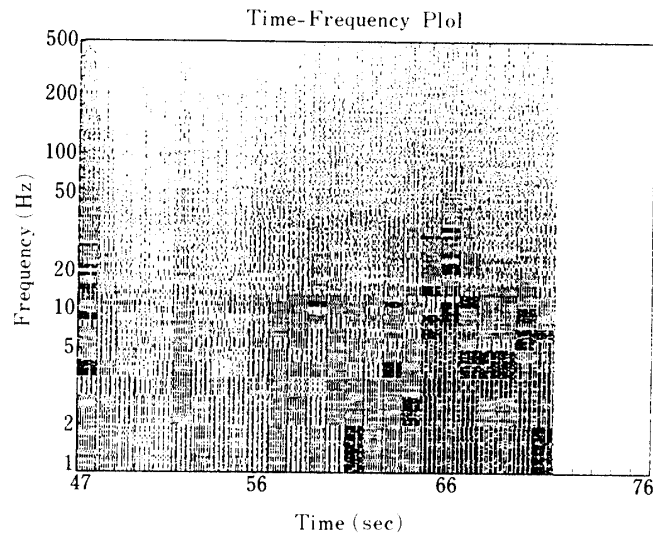


図 8 ロケット上昇時の電子密度ゆらぎのダイナミックスペクトル：縦軸は周波数で、横軸は時刻である。47 秒のプロープ展張のところが黒くなっている。58 秒頃から電子密度ゆらぎが見えてくる。200 Hz 付近にはロケットウェイクに基づくピークが現れている。さらに詳細に見るとそのピークはアンテナ展張直後の低電子密度領域からレベルは小さいが出現している。66 秒、高度約 88 km のところで電子密度ゆらぎが最大になっている。

とがわかる。観測高度は 84.7 km、電子密度は約 110/cc、密度ゆらぎの大きさは～15 % である。

Ⅲ-2. 解析結果-2

① ロケット上昇時のダイナミックスペクトル

第 8 図はロケットの上昇時の電子密度のゆらぎのダイナミックスペクトルである。47 秒のプロープ展張のところが黒くなっている。58 秒頃から電子密度ゆらぎが見えてくる。200 Hz 付近にはロケットウェイクに基づくピークが現れている。さらに詳細に見るとそのピークはアンテナ展張直後の低電子密度領域からレベルは小さいが出現している。発射 66 秒、高度約 88 km の所で電子密度ゆらぎが最大になっている。

② ロケット下降時のダイナミックスペクトル

第 9 図は降りの電子密度ゆらぎのダイナミックスペクトルである。370 秒から 385 秒のデータであるが全体に黒っぽくなっている。時間の経過とともに全体にノイズが減少していくのがわかる。200 Hz 付近のノイズは少し広帯域になっていくようである。

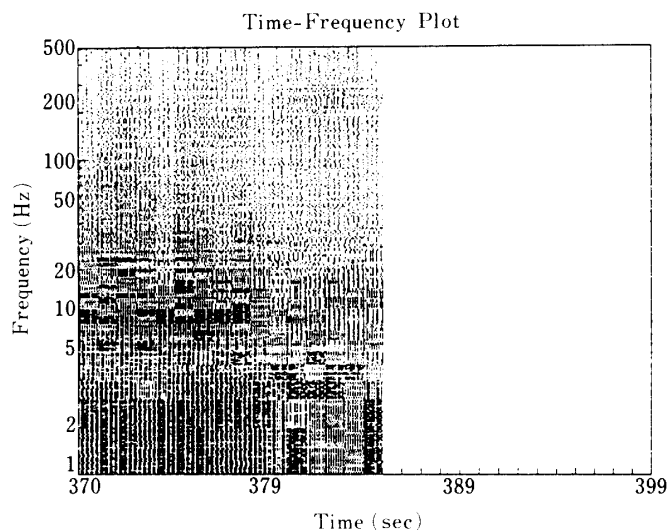


図 9 ロケット降下時の電子密度ゆらぎのダイナミックスペクトル：370 秒から 385 秒のデータであるが全体に黒っぽくなっている。時間とともにノイズが減少していくのがわかる。200 Hz 付近のノイズは少し広帯域になっていく。

IV. ウェイクの擾乱の特性と考察

第 10 図はロケット上昇時の 47 秒から 71 秒までの密度ゆらぎの周波数スペクトルを並べたものである。アンテナがロケットウェイクの端の領域に近づくと現れるピークの周波数は 200 Hz 付近で周期的に変化している。また約 3 秒の周期でピークが出る。そのピークはアンテナ展開直後の低電子密度領域からレベルは小さいが出現し、第 2 高調波の位置に二つ目のピークが出ることがある。これはロケットウェイクの端の領域の電子密度の乱れに起因する一種の電子密度ゆらぎと思われる。ロケットの降下時には著しくノイズ的な幅広いピークが高周波数領域に現れる。プローブによる観測では避けることが困難であると考えられる。この様なウェイクの擾乱の特徴を次に列記する。

ウェイクの擾乱の特徴

- ① アンテナがロケットウェイクの端領域に近づくと大きな電子密度ゆらぎが観測され、周波数解析結果の 200 Hz 付近に山状の盛り上がりが見れる。
- ② そのピークの周波数は 200 Hz 付近で周期的に変化する。
- ③ 約 3 秒の周期でピークが見れる。
- ④ そのピークはアンテナ展開直後の低電子密度領域からレベルは小さいが出現している。
- ⑤ 第 2 高調波の位置に二つ目のピークが出ることがある。
- ⑥ 降下時の周波数解析結果の高周波領域は著しくノイズ的である。
- ⑦ 降下時の低高度領域では電子密度ゆらぎの信号は特に目立たないがその周波数解析

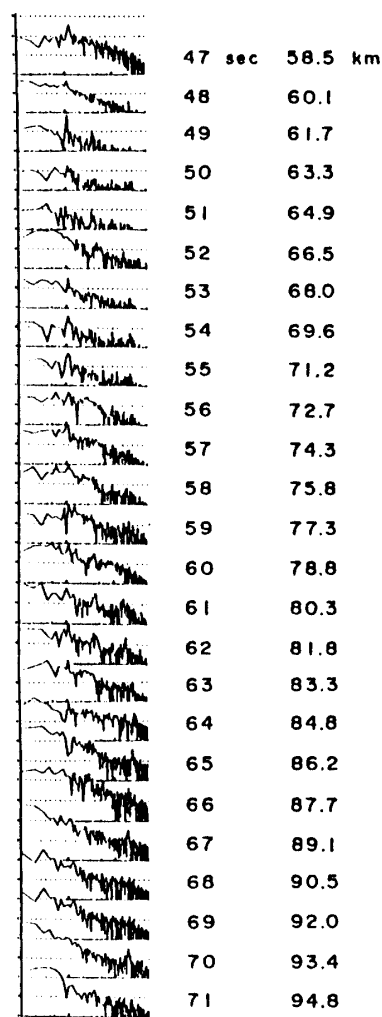


図10 ロケット上昇時の電子密度ゆらぎの周波数スペクトル：高周波数領域に現れるピークの周波数は200 Hz付近で周期的に変化し、約3秒の周期でピークが出る。そのピークはアンテナ展開直後の低電子密度領域からレベルは小さいが出現し、第2高調波の位置に二つ目のピークが出ることもある。

結果の200 Hz付近には大きな山状の盛り上がりが見れる。

- ⑧ 周波数解析結果の200 Hz付近に現れる山状の盛り上がりの時間的な変化、周波数的な変化がロケットの速度、姿勢、アンテナとの位置関係、磁気の強さおよび角度などどのように関連があったかは今後の検討課題の一つである。

V. プローブ展開時の特性

第10図はロケット上昇時に観測された電子密度ゆらぎの周波数解析の結果得られた周波数スペクトルである。一番上の周波数スペクトルは第3図で掲げた発射47秒のプローブ

展張時のデータの解析結果である。約 47.26 秒のプローブ展張後に続いて生じた振動に基づく周期的ノイズに相当するピークが約 13 Hz に出ている。アンテナ展張直後の低電子密度領域での解析結果は電子密度ゆらぎが小さいのでレベルは小さくなっている。むしろこのプローブ展張時のデータの方がレベルは大きく、第 8 図のダイナミックスペクトルに示すように僅かばかり黒くなっている。電子密度測定用インピーダンスプローブは機体からプラズマ中に突き出した金属製プローブの RF 帯における等価容量値の周波数スペクトルを容量ブリッジの不均衡成分として測定するものである。測定された周波数スペクトルから検出される UHR, PR, SHR などの共鳴周波数およびプローブの周囲に形成されるイオンシース等価容量値(CS)から電子密度を高精度で観測する装置である。しかしながら展張時のプローブ等価容量値の周波数スペクトルのデータの時間変化からアンテナ振動の様子を明確に把握することは困難である。今回はじめて、プローブ電流を周波数解析することによってアンテナ展張時の振動の様子を明らかにした。

VI. スペクトル指数の高度分布と密度ゆらぎの生成機構の考察

第 11 図は観測されたスペクトル指数の高度分布である。74 km から 93 km の高度領域で 0.9~1.9 である。K-9 M-44 号機の観測の結果を半影で示している。高度 91 km から 113 km の領域で 2.2~4.1 で、高度 183 km 以上で 1.0~1.4 である[3]。電離層 E 層領域の電子密度ゆらぎの生成の機構はクロスフィールド不安定と中性大気乱流などの理論によ

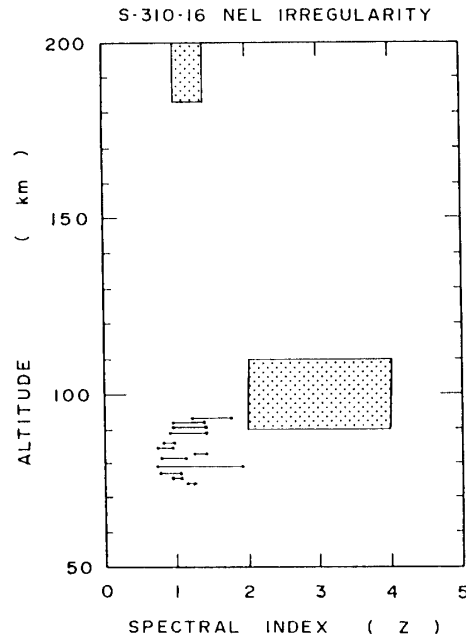


図 11 スペクトル指数の高度分布：74 km から 93 km の高度領域で 0.9~1.9 である。K-9 M-44 号機の観測の結果を半影で示している。高度 91 km から 113 km の領域で 2.2~4.1 高度 183 km 以上で 1.0~1.4 である。

って説明されている。

中性粒子密度のゆらぎのスペクトル指数は $5/3$ である。Zimmerman は chemical release の実験でこの値を確認している。この中性大気密度のゆらぎは高度約 110 km に及ぶ。また電子密度の高度分布に正あるいは負の高度勾配があっても構わない[9][10]。一方のクロスフィールド不安定のスペクトル指数の理論値は 3 で電子密度ゆらぎの大きさは 30~50 % である[7][8]。Prakash は赤道 E 領域でロケット実験を行って、スペクトル指数が 2~4 で、電子密度ゆらぎの大きさが 1~20 % であり、また、電子密度の高度分布に正の高度勾配がある場合に生じることを明らかにした[4][5][6]。中低緯度 E 領域では上述の K-9 M-44 号機の観測によって高度 91 km から 113 km の領域でスペクトル指数が 2.2~4.1 で、密度ゆらぎの大きさが 1~5 % であり、また密度ゆらぎの大きさが高度 92~95 km で最大になったことが報告されている[3]。

この実験の観測結果は、①中低緯度のロケット観測のプロープ法によって、②電離層 E 層下部領域の 74 km から 93 km のところで、③波長 3 m~300 m の電子密度ゆらぎが観測され、④その密度ゆらぎの大きさが 1~15 % で、⑤電子密度ゆらぎのスペクトル指数が 0.9~1.8 であり、⑥密度ゆらぎの大きさが高度 88 km で最大になったということである。以上から次のような結論が得られる。

- ① スペクトル指数の値 0.9~1.8 はクロスフィールド不安定の理論値の 3、および観測ロケットの実験値の 2~4 より小さい。
- ② スペクトル指数の値 0.9~1.8 は中性大気乱流の理論値および実験値の $5/3$ に近い。プロープ表面の汚れの影響を考慮すると全体的により近づく。
- ③ 密度ゆらぎの大きさは 1~15 % でクロスフィールド不安定の理論値 30~50 %、赤道上の実験値 1~20 %、中低緯度の実験値 1~5 % などに比べて変らない。
- ④ 電離層 E 層下部領域の 74 から 93 km のところでの観測の結果は中性大気乱流の効果が高度約 110 km に及ぶという観測報告に矛盾しない。
- ⑤ 電離層 E 層の電子密度の高度分布が正の高度勾配になる約 90 km の高度領域での観測結果は中性大気乱流の理論およびクロスフィールド不安定の理論のどちらの理論によっても説明することができるがスペクトル指数の観測値を考慮に入れると中性大気乱流の理論ということになる。
- ⑥ 密度ゆらぎの大きさが高度 88 km で最大になったが今迄の報告と特に変らない。

VII. 結 び

- ① プロープ電流を周波数解析することによってアンテナ展張時の振動の様子を明らかにした。
- ② ロケットウェイクの端領域の電子密度ゆらぎの特性が調べられた結果、特にロケット降下時にはプロープ観測の結果で電離層を厳密に検討する場合に注意を要することがわかった。
- ③ ロケット上昇時に電離層 E 層下部の高度 74 km から 93 km の領域で、波長が 3 m から 300 m の電子密度ゆらぎを観測することができた。

- ③-1 密度ゆらぎの大きさは1~15%であった。
- ③-2 電子密度ゆらぎの測定データを周波数解析した結果、ゆらぎのスペクトル指数は0.9~1.8であった。
- ③-3 電子密度のゆらぎの大きさが最大になる高度は88 kmであった。
- ④ 今回、観測された電離層E層下部領域の電子密度ゆらぎは中性大気乱流の理論で説明することができることがわかった。

VIII. 謝 辞

観測ロケット S-310-16 号機の実験主任に感謝致します。また、データを周波数解析するにあたって、東京大学理学部の中村俊也君に計算機のプログラムの開発を援助して頂きましたのでここに謝意を表します。搭載したプローブなどの機構部は明星電気株式会社・宇宙開発部の篠田氏のお世話になりました。

参 考 文 献

- [1] 渡辺, 雨宮, 中村, S-310-16 号機による電離層電子密度の観測, 昭和 61 年度宇宙観測シンポジウム(1986), 154.
- [2] 渡辺, 大林, S-310-14 号機による電離層電子密度の観測, 昭和 59 年度宇宙観測シンポジウム(1984), 100.
- [3] Itoh, T., M. Nakamura, and Y. Nakamura, Rocket Observation of Electron Density Irregularities in the Middle Latitude E Region, Geophys. Res. Lett., Vol. 2, No. 12, 553, 1975.
- [4] Prakash, S., S. P. Gupta, and B. H. Suffaraya, A study of the irregularities in the night time equatorial E-region using a Langmuir probe and plasma noise probe, Planet. Space Sci., No. 18, 1307, 1970.
- [5] Prakash, S., S. P. Gupta, and B. H. Suffaraya, Cross Field instability and ionization irregularities in equatorial E region, Nature Phys. Sci., No. 230, 170, 1971a.
- [6] Prakash, S., S. P. Gupta, B. H. Suffaraya, and C. L. Jain, Electrostatic Plasma instabilities in the equatorial electrojet, Nature Phys. Sci., No. 233, 56, 1971b.
- [7] Sato, T., and T. Tsuda, Computer study of nonlinear cross-field instability, Phys. Fluids, No. 10, 1262, 1967.
- [8] Tsuda, T., T. Sato, and S. Matsushita, Ionospheric Irregularities and Cross Field Plasma Instability, J. Geophys. Res., **74**, 2923, 1969.
- [9] Zimmerman, S. P. and C. A. Trowbridge, The Measurement of Turbulent Spectra and Diffusion Coefficients in the Altitude Region 91 to 110 km, Space Res., **13**, 203, 1973.
- [10] Zimmerman, S. P., Turbulence Observed in Electron Density Fluctuations in the Equatorial E Region Over Thumba, India-A Reanalysis, J. Geophys. Res., Vol. 81, No. 28, 5201, 1976.