

## ロケットによる極域電離層プラズマのじょう乱の観測

森 弘隆\*・小川忠彦\*・宮崎 茂\*

### Rocket Observations of Plasma Irregularities in the Auroral Ionosphere

Hiroataka MORI\*, Tadahiko OGAWA\* and Shigeru MIYAZAKI\*

**Abstract:** This paper reports the analytical results of electron density irregularities observed in the disturbed nighttime *E*-region by S-210JA-25, which was fired by the 17th Japanese Antarctic Research Expedition party. These irregularities were observed in the height range of 102–113 km by a Langmuir probe on board the rocket. It is found that the height variation of the frequency spectrum of the irregularities can be explained by theories of the cross-field and two-stream instabilities. However, the fact that the irregularities decayed abruptly above the height of 113 km is inconsistent with the theoretical prediction.

**要旨:** S-210JA-25 により観測された電子密度じょう乱の解析結果の報告である。S-210JA-25 は第17次観測隊により、オーロラの発生期間中に発射されたが、搭載されたラングミュアプローブにより、高度 102 km から 113 km の範囲で、強い電子密度じょう乱が観測された。このじょう乱の周波数スペクトルの高度特性は、クロスフィールド不安定、および二流体不安定の理論によって説明できることが明らかにされたが、高度 113 km 以上でじょう乱が急激に減衰している観測結果は、理論的予想と異なっていた。

### 1. は じ め に

極域の電離層は磁気圏と密接に結びついている。特にサブストーム中の電離層は、磁気圏の大規模な活動を反映して、オーロラ現象に象徴される複雑な様相を呈する。この時、アイオノゾンデやオーロラレーダにより、しばしば *E* 層のプラズマ中にじょう乱が生じていることが観測される。これらのじょう乱の発生機構の解明は、電離圏—磁気圏相互作用における電離圏の果たす役割を調べる上で重要と思われる。

一般に、プラズマのじょう乱機構を解明するには、局所的に発生している波動の観測と

\* 郵政省電波研究所。Radio Research Laboratories, 2-1, Nukui-kitamachi 4-chome, Koganei-shi, Tokyo 184.

合わせて、背景のプラズマや電場、磁場の状態などを総合的に観測することが必要なので、ロケットによる直接観測が威力を発揮する。昭和基地におけるロケット観測は1970年に始まり、1973年までに20機を越えるロケットが発射された。そのうち、8機にラングミュアプローブが搭載され、高度約130 km以下の電子密度、電子温度の観測が行われたが、高度90–120 kmで、しばしばプローブ電流に振幅数%のゆらぎが認められた。プローブ電流はプラズマの密度に比例するので、この領域にプラズマのじょう乱が発生していたものと推定されたが、詳しい解析は困難であった (OGAWA *et al.*, 1975, 1976)。ロケット観測は1976年に再開され、S-310型1機を含む、7機が発射されたが、これらのロケットには、基本測定器として、ラングミュアプローブが搭載された。観測結果は、捕集電流が異常に少なかった1機 (S-210JA-24) を除く6機に関して解析され、電子密度、電子温度の高度プロファイルが得られた (小川他, 1979)。一方、電流のゆらぎに関しても新たなデータが得られたが、特に、S-210JA-25では強いゆらぎが観測された。以下では、この観測結果をもとに、同時に搭載された電場測定器 (AEF) の結果を参考にして、プラズマ不安定の立場から、ゆらぎの発生機構に関する検討を行う。

## 2. S-210JA-25 の観測

測定用プローブとして、直径3 mm、長さ200 mmの円筒形プローブ2本 (略称EP, およびLP) を使用した。各プローブへの印加電圧、および測定内容については、他の報告 (小川他, 1979) の第2節に詳しく述べられているので省略するが、今回は特に、LPにラングミュアプローブ測定用の三角波状電圧印加モードの他に、プローブ電流ゆらぎを詳しく測定するための+2.5 Vの一定電圧印加モードがつけ加えられた。2つのモードは4秒間切り換えて観測され、IRIG ch. 15で伝送された。

ロケットは、9月1日03:01に発射された。このとき、オーロラは存在していたが、ロケットはその北側を磁力線に沿って上昇した。図1の左図は、プローブEP, およびLPにより得られた、ロケット上昇時における電子密度 ( $N_e$ )、電子温度 ( $T_e$ )、および密度じょう乱 ( $\Delta N_e$ ) の観測結果である。 $\Delta N_e$ の観測された高度範囲は、 $N_e$ のプロファイルの太線部分で示されている。図中の  $T_n$  は、標準大気モデルによる中性大気温度のプロファイルである。このロケットには、相乗り機器として、電場測定器 (AEF) が搭載されており、DC電場 ( $E$ )、および約100 Hz以下のAC電場成分 ( $\Delta E$ ) の観測が行われた (小川他, 1979)。図1の右図は、比較のために、その観測結果を引用したものである。ロ

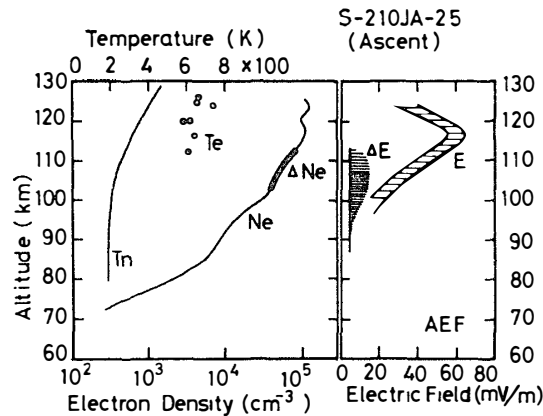


図 1 ロケット上昇時における電子密度 ( $N_e$ )、電子温度 ( $T_e$ )、直流電場の大きさ ( $E$ ) の高度プロファイル、および電子密度じょう乱 ( $\Delta N_e$ ) と交流電場成分 ( $\Delta E$ ) の観測された高度範囲。  $T_n$  は標準大気モデルによる中性大気温度の高度プロファイルを示す。

Fig. 1. Profiles of electron density ( $N_e$ ), electron temperature ( $T_e$ ), and DC electric field ( $E$ ), along with the observed high ranges of electron density irregularities ( $\Delta N_e$ ) and AC electric field ( $\Delta E$ ).  $T_n$  is the standard neutral temperature.

ケット発射時の  $\Delta H=0\gamma$ 、 $CNA=0\text{ dB}$  で、電離層は静穏であったが、このことは、電子密度プロファイルや電子温度の測定結果からもうかがわれる。しかしながら、直流電場の測定値はかなり高く、高度 116 km で、60 mV/m にまで達している。密度ゆらぎ  $\Delta N_e$  と電場ゆらぎ  $\Delta E$  とは、ほぼ同じ高度で観測されているが、両方共、高度 113 km で急激に減衰している。 $\Delta E$  は、 $\Delta N_e$  よりも低高度まで観測されているが、これは、 $\Delta E$  の方が検出感度が高いためと考えられる。同様の傾向はロケット下降時にも観測されたが、ロケットの wake の影響等で測定精度が低下するので、主に上昇時のデータを使用して解析を進めた。 $\Delta N_e$  は、高度約 102–113 km の間で観測されたが、その間に、105 km と 110 km で LP の固定電圧モードのデータが得られた。図 2 は、110 km におけるプローブ電流波形と、スペクトルアナライザによる 2 例の周波数分析結果である。電流波形の大きなうねりは、周期約 2 Hz のロケットスピンの影響によるものであるが、これに重畳している細かい波形が問題の密度ゆらぎである。2 例のスペクトルを比較すると、両者共ほぼ平坦な特性を示しているが、105 km の例では全体に高周波側で下り勾配になっているのに対して、110 km の例では 200 Hz 付近にゆるいピークを持っているように見える。図 3 は、 $\Delta E$  の観測データを同じスペクトルアナライザで解析したものである。高度と共に、ゆらぎの強度やピーク周波数が変化していく様子がわかる。 $\Delta N_e$  と  $\Delta E$  の対応する高度

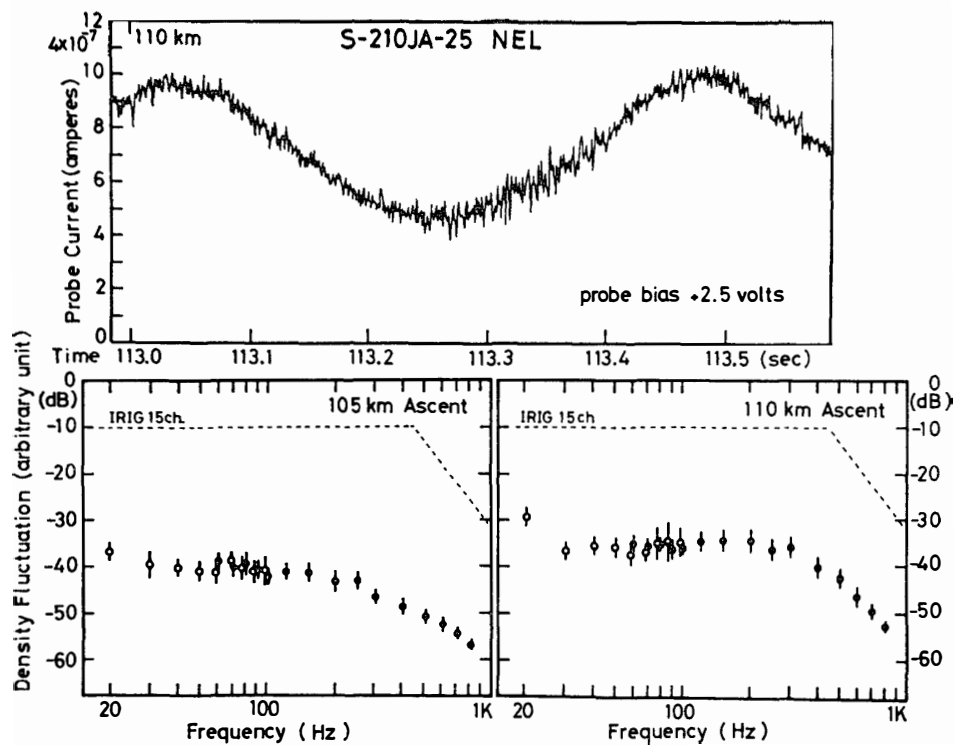


図 2 高度 110 km におけるプローブ電流波形, および 105 km と 110 km における電流波形の周波数スペクトル。

Fig. 2. A typical wave form of the probe current observed around 110 km (upper), and frequency spectrum of the probe current at 105 km, and 110 km (lower).

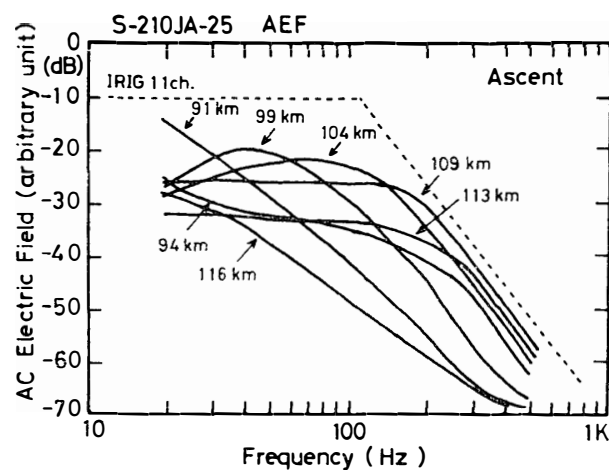


図 3 電場測定器 (AEF) により観測された交流電場成分 ( $\Delta E$ ) の周波数スペクトルの高度変化

Fig. 3. Height variation of the frequency spectra of AC electric field ( $\Delta E$ ) observed by the AEF payload.

でのスペクトルの形はほぼ似ているといえる。

### 3. 理論的考察

プローブ電流にじょう乱を与える原因として、いくつかの可能性を考えることができる。

- 1) プラズマ波動: 一般に、プラズマ中に局所的不安定が生ずると、波動が励起され、その振幅が数%に達することはめずらしくない。
- 2) 電磁波雑音: 極域では、しばしばヒス、コーラス、ホイストラ等の低周波電磁波が観測されるが、その強度が十分強ければ、その変動電界がプローブの電位変動を誘起するかも知れない。
- 3) 降下粒子流のゆらぎ:  $E$  層プラズマの生成に寄与する粒子流の流量に時間的、空間的ゆらぎがあれば、プラズマの密度に不均一が生ずることが予想される。
- 4) 中性大気じょう乱:  $E$  層では、中性粒子とイオンとの衝突が無視できないので、中性大気が乱れれば、プラズマもそれに追従する。
- 5) ロケットにより作られる乱れ: 超音速で飛しょうするロケットの周囲には衝撃波面が形成される。このような境界領域には、条件によっては乱れが発生する。また、ロケット電位の効果や搭載測定器自体によるプラズマのじょう乱も考慮する必要がある。

以上5つの可能性は、いずれも簡単には否定できないものばかりで、個々の場合に依じて慎重な検討を要するが、ここでは、プラズマ波動の可能性についての簡単な検討結果について述べる。

これまで、 $E$  層に生ずるプラズマ不安定として知られているものに、クロスフィールド不安定と二流体不安定がある。いずれも、 $E$  層プラズマのイオンと電子の移動度の違いが原因となって生ずる不安定である。図4は、標準大気モデルを使って、 $E$  層電場の大きさに対するプラズマのイオンと電子の相対ドリフト速度を計算したものである。図中の  $C_s$  は音速を示している。この図から、 $E$  層では DC 電場が 30 mV/m 以上になると、ドリフト速度が音速を越えると推定される。図5は、流体理論で導かれた、クロスフィールド不安定の場合のドリフト速度と波動の発生上限周波数である (ROGISTER and D'ANGELO, 1970)。ドリフト速度が音速  $C_s$  に近付くと、流体理論は使えなくなるが、さらに詳しい運動理論 (FARLEY, 1963) によれば、ドリフト速度が音速を越える二流体不安定の状態でも、図6のように、不安定の上限周波数は有限になる。図7は、以上の理論をもとに、

S-210JA-25 の観測結果の検討を行ったものである。左図は、AEF による電場の実測値から求めたプラズマのドリフト速度 ( $V_d$ ) で、右図は、各高度での  $V_d$  の大きさに応じて、クロスフィールド不安定、および二流体不安定により発生が予想される波動の上限周波数

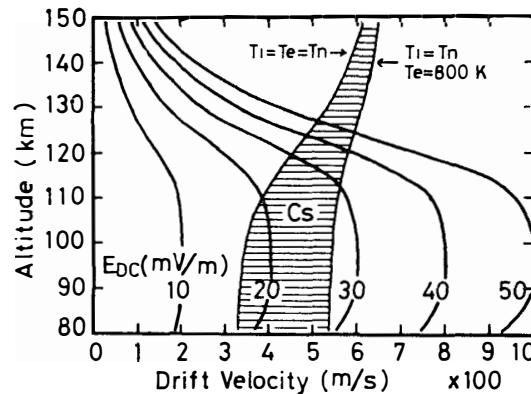


図 4 標準大気モデルを使った、 $E$  層電場に対するプラズマのドリフト速度の計算。図中、 $C_s$  は音速を示す。

Fig. 4. Model calculation of the plasma drift velocity corresponding to a DC electric field ( $E_{DC}$ ), by using the standard atmosphere model.  $C_s$  is the sound velocity.

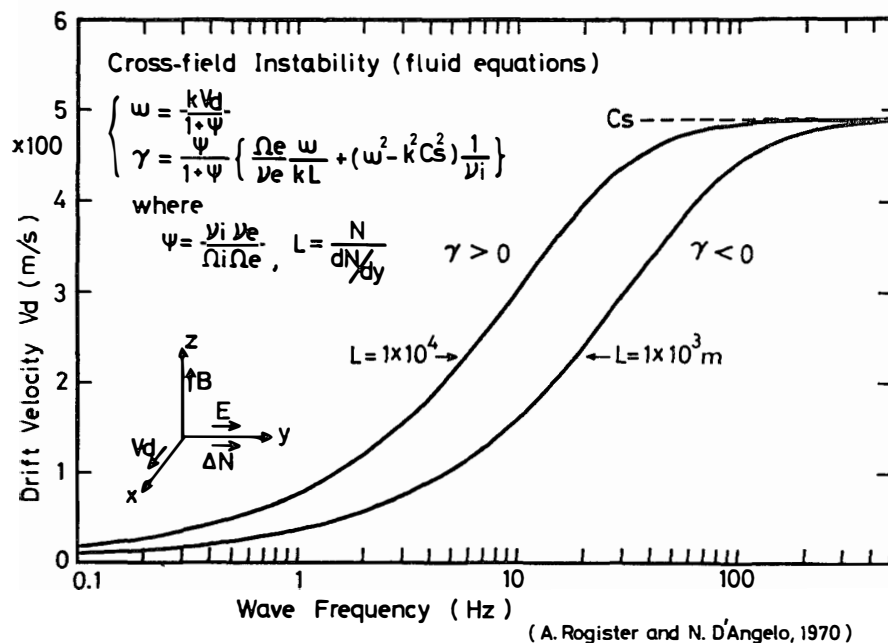


図 5 流体理論による、クロスフィールド不安定の場合のプラズマのドリフト速度と波動の上限周波数との関係。

Fig. 5. Calculation of the uppermost wave frequency generated by the cross-field instability versus plasma drift velocity (ROGISTER and D'ANGELO, 1970).

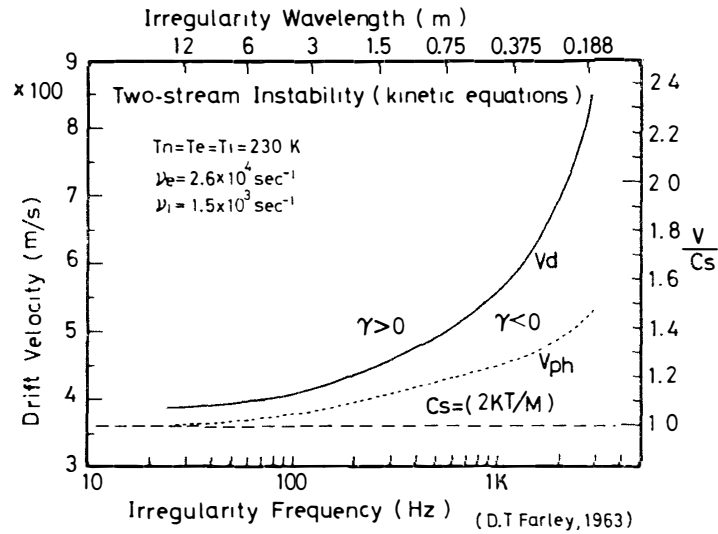


図 6 運動理論による，二流体不安定の場合のプラズマのドリフト速度と波動の上限周波数との関係。

Fig. 6. Calculation of the uppermost wave frequency generated by the two-stream instability versus plasma drift velocity (FARLEY, 1963).

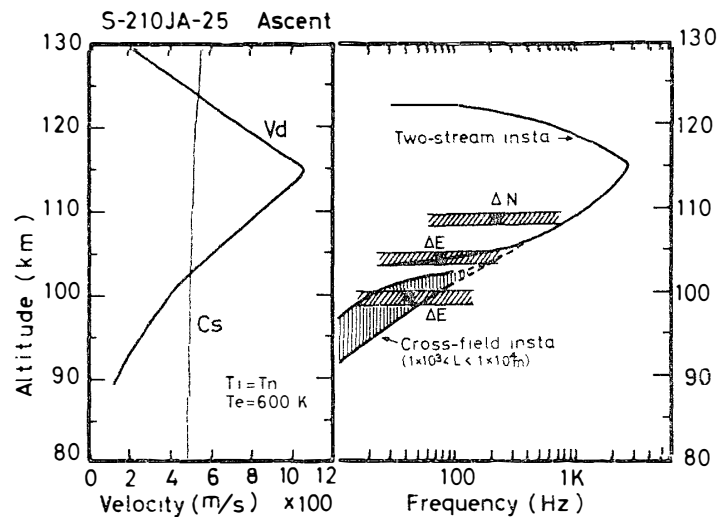


図 7 電子密度じょう乱 ( $\Delta N_e$ ) および交流電場成分 ( $\Delta E$ ) の観測結果と，クロスフィールド不安定および二流体不安定により予想される波動の上限周波数との比較。左図の  $V_d$  は DC 電場の観測値により計算されたプラズマのドリフト速度， $C_s$  は音速を示す。

Fig. 7. Comparison of the observed irregularities ( $\Delta N_e$  and  $\Delta E$ ) with the uppermost wave frequency predicted by the cross-field and two-stream instabilities (see Figs. 5 and 6). Also shown are the drift velocity ( $V_d$ ) computed from the observed DC electric field and the velocity ( $C_s$ ).

と、実測された密度ゆらぎ  $\Delta N_e$  と電場ゆらぎ  $\Delta E$  の周波数分布を示している。クロスフィールド不安定の場合には、図5に示されているように、磁力線と直交する DC 電場方向の密度勾配  $dN/dy$  の大きさが、不安定条件の一つの重要なパラメータになっているが、我々の観測では、ロケットはほぼ磁力線に平行に上昇したので、残念ながら上昇時における  $dN/dy$  の実際の観測結果は得られていない。したがって、右図では、E 層に一般的に予想される密度勾配の範囲として、 $1 \times 10^3 < L < 1 \times 10^4 \text{ m}$  をとり、その両端における理論結果を記したが、これらの結果と、高度 100 km 付近の  $\Delta E$  の実測スペクトルが重なっていることから、この領域のプラズマじょう乱がクロスフィールド不安定で説明できる可能性が考えられる。さらに、右図によれば、理論的には高度 105–123 km で二流体不安定が卓越していると予想されるが、実測結果によれば、高度 110 km 付近でゆらぎ強度が最大になり、周波数スペクトルも理論的予想に近い広がりを見せているが、それより上では急激に減衰し、高度 113 km 以上では存在しない。この理由に関しては、目下不明であるが、相乗り機器による電流層の実測結果が得られれば、さらに詳しい検討が可能になるものと思われる。

#### 4. お わ り に

昭和基地でのロケット実験で、これまでしばしば観測されてきた、E 層のプラズマじょう乱の発生機構に関して、今回は S-210JA-25 のデータをもとに、プラズマ不安定の可能性に関する検討を行ったが、観測結果の完全な理解にはいたらなかった。今後は、さらに他の可能性をも含めた検討を進める必要がある。第 18 次、19 次のロケット実験においても、プラズマじょう乱に関する観測が予定されているので、結果を期待したい。

#### 謝 辞

厳しい環境の中でロケット実験の成功にご努力された第 17 次南極観測隊越冬隊のロケット実験班各位に深く感謝いたします。電場の観測データを提供していただいた京都大学の小川俊雄助教授に感謝いたします。このロケット実験は国立極地研究所の支援により行われたものである。

#### 文 献

FARLEY, D. T., Jr. (1963): A plasma instability resulting in field-aligned irregularities in the



- ionosphere. J. Geophys. Res., **68**, 6083–6097.
- OGAWA, T., MORI, H. and MIYAZAKI, S. (1975): Electron density irregularities observed in the Antarctic auroral *E* region. J. Radio Res. Labs., **22**, 1–21.
- OGAWA, T., MORI, H. and MIYAZAKI, S. (1976): Rocket observations of electron density irregularities in the Antarctic auroral *E* region. J. Geophys. Res., **81**, 4013–4015.
- 小川忠彦・森 弘隆・宮崎 茂 (1979): ロケット観測で得られた極域電離層の電子密度・温度プロフィール. 南極資料, **65**, 15–27.
- 小川俊雄・森田 護・福西 浩・松尾敏郎・芳野赳夫 (1979): 南極ロケット S-210JA-24, 25 号機による電離層電場の観測. 南極資料, **63**, 252–275.
- ROGISTER, A. and D'ANGELO, N. (1970): Type II irregularities in the equatorial electrojet. J. Geophys. Res., **75**, 3879–3887.

(1978 年 6 月 10 日受理)