

南極ロケット S-310JA-1, 2 号機による高周波帯電波放射の 観測—PWH の観測結果

大家 寛*・宮岡 宏*・宮武貞夫**

Observation of HF Plasma Wave Emissions at Ionospheric Level
Using Sounding Rockets S-310JA-1, 2 in Antarctica

Hiroshi OYA*, Hiroshi MIYAOKA* and Sadao MIYATAKE**

Abstract: Observations of the plasma wave emissions in a high frequency range from 0.1 to 10 MHz have been made using the ionospheric sounding rockets S-310JA-1, and 2, launched on February 13, 1976 and on February 10, 1977, respectively, from Syowa Station in Antarctica. The observed HF plasma waves are characterized by the electrostatic electron cyclotron harmonic waves generated by the beam-wave interaction in the ionosphere.

The flight of S-310JA-1 rocket was carried out after the termination of a sub-storm effect, where the drifting electrons were making enhanced precipitation near the rocket path; enhancement of the HF plasma waves was remarkable at UHR (upper hybrid resonance) frequency and in a frequency range lower than the electron cyclotron frequency associated with nonlinear wave-particle interactions. The S-310JA-2 flight was made during the particle precipitation of a diffuse aurora where the HF emissions were weaker than the case of S-310JA-1, due to soft precipitation of particles.

要旨. 南極ロケット S-310JA-1, 2 号機に搭載された PWH により, 南極域電離層における HF 帯電波スペクトルの観測が行われた. 電子サイクロトロン周波数以下の周波数帯域および UHR 周波数近傍に狭帯域の顕著なエミッションが観測された. これらのエミッションは数 keV レンズの電子フラックスとの対応がよく, このエネルギー範囲の降下電子によるヒーム不安定の結果, 励起された静電的電子サイクロトロン波と考えられる. 1 および 2 号機で観測されたスペクトルの違いは, それぞれの発射時におけるサブストームフェイズの相違に基づいており, これらの観測結果は, 極域電離層における波動-粒子相互作用を解明する上で重要な情報を与える.

1. 序

極域電離層は, active なプラズマ現象の生起する領域で, 降下する粒子群は, プラズマの波動-粒子相互作用の結果, 種々の様相をもった電波を発射する. この電波のうち, VLF 領域

* 東北大学理学部地球物理学教室 Geophysical Institute, Tohoku University, Aramaki Aoba, Sendai 980

** 電気通信大学 University of Electro-Communications, 5-1, Chofugaoka 1-chome, Chofu 182

については、地上でも多く観測されてきたが、特に数 100 kHz から、2-3 MHz に至る中波ないしは中短波の領域では、電離層の妨害によって観測は不可能となっている。一方、衛星観測では、もっと高度の高い領域で発生する電波に関心が集められていて、結局、電離層レベルの中短波の電波領域は、長い間、観測の対象からはずれていた。今回、S-310JA-1 および 2 号機によって、この分野で新たな発見がもたらされることになった。以下その内容を報告する。

2. 観測システム

PWH (Plasma wave in high frequency range) 装置のブロック図を図 1 に示す (ただし 1 号機の場合)。この観測装置では、100 kHz-10 MHz に達する周波数領域のスペクトルを 2 周波数帯 (100kHz-1 MHz および 1 MHz-10 MHz) に分離して、それぞれ 250 msec で掃引計測す

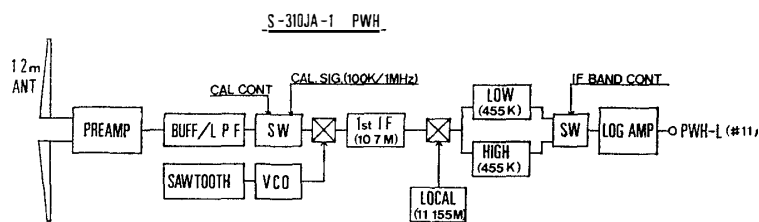


図 1 S-310JA-1 号機に搭載された PWH のブロック図

Fig 1 Block diagram of PWH system on board S-310JA-1

表 1 S-310JA-1 号機および 2 号機に搭載された PWH の諸元

Table 1 PWH parameters on board S-310JA-1, 2.

	S-310JA-1		S-310JA-2	
Frequency range	(Low)	0 1-1 MHz	(Low)	0 1-1 MHz
	(High)	1-10 MHz	(High)	1-10 MHz
Sweep time	(Low)	250 msec	(Low)	250 msec
	(High)	250 msec	(High)	250 msec
1st IF frequency		10.7 MHz		30 MHz
2nd IF frequency		455 kHz		455 kHz
Band width	(Low)	5 kHz	(Low)	5 kHz
	(High)	50 kHz	(High)	40 kHz
Sensitivity		$5 \mu V_{rms}$		$2 \mu V_{rms}$
Dynamic range		60 dB		60 dB
Sensor		1.2 m \times 2 dipole ant.		1.2 m \times 2 dipole ant.
Telemeter channel		(PWH-L) IRIG #11		(PWH-L) IRIG #13
		(PWH-F) IRIG # 4		(PWH-R) IRIG # 7

る。受信機は, double super の heterodyne 方式で構成され, local 信号周波数を sweep し, 周波数分析する。第 1 中間周波数は, 10.7 MHz (ただし 2 号機では 30 MHz), 第 2 中間周波数は 455 kHz としている。入力感度 $5 \mu\text{V}_{\text{rms}}$ で, ダイナミックレンジ 60 dB, 帯域は 5 kHz (低い周波数領域に対して) および 50 kHz (高い周波数領域に対して) の受信機が 1.2 m の長さをもつ一対のタイポールアンテナに接続している。観測データは, log amp により 60 dB のダイナミックレンジが $0-5\text{V}_{\text{p-p}}$ の範囲に圧縮され, #11 (2 号機では #13) のテレメータチャンネルで地上へ伝送される。なお, 表 1 に 1 号機および 2 号機に搭載された PWH の諸元を示す。

3. 観 測 結 果

3.1. S-310JA-1 号機の観測結果

S-310JA-1 号機は, 1976 年 2 月 13 日 12 時 45 分 (45° EMT), 昭和基地より発射角 80° , 発射方位 315° で打ち上げられ, 最大到達高度は 215 km に達した。図 2 はこの飛しょう期間に観測された HF 帯電波のスペクトルの一例である。約 1 MHz を境にして, その近傍およびそれ以下の周波数領域に卓越したエミッションとそれ以上の周波数帯域に離散的に現れるエミッションとがある。いずれも比較的狭帯域の構造をしているのが特徴である。エミッションの強度は, 最も大きいもので約 $120 \mu\text{V}_{\text{rms}}$ (入力換算) である。なお, 図 2 で左右両端に大きく出ているのは 0 ヒートで, 中間周波数と局部発振周波数の一致した点である。また, 0 1-

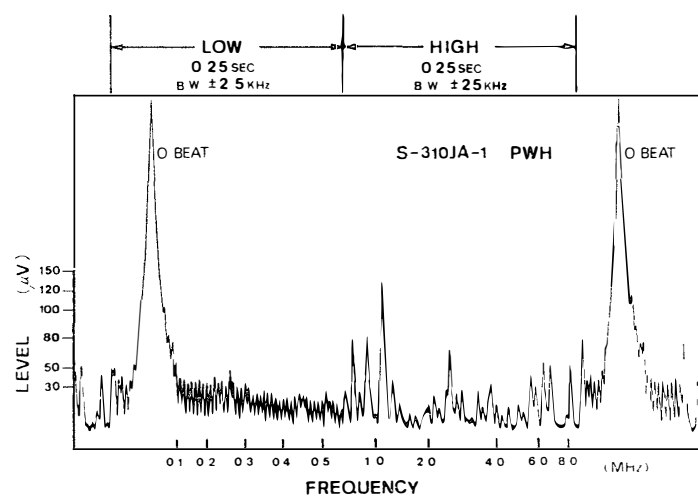


図 2 S-310JA-1 号機の PWH で観測された HF 帯電波スペクトル (一掃引分の出力波形を示す)

Fig 2 Spectrum of HF plasma wave emissions observed by S-310JA-1, during one sweep period from 0.1 to 10 MHz

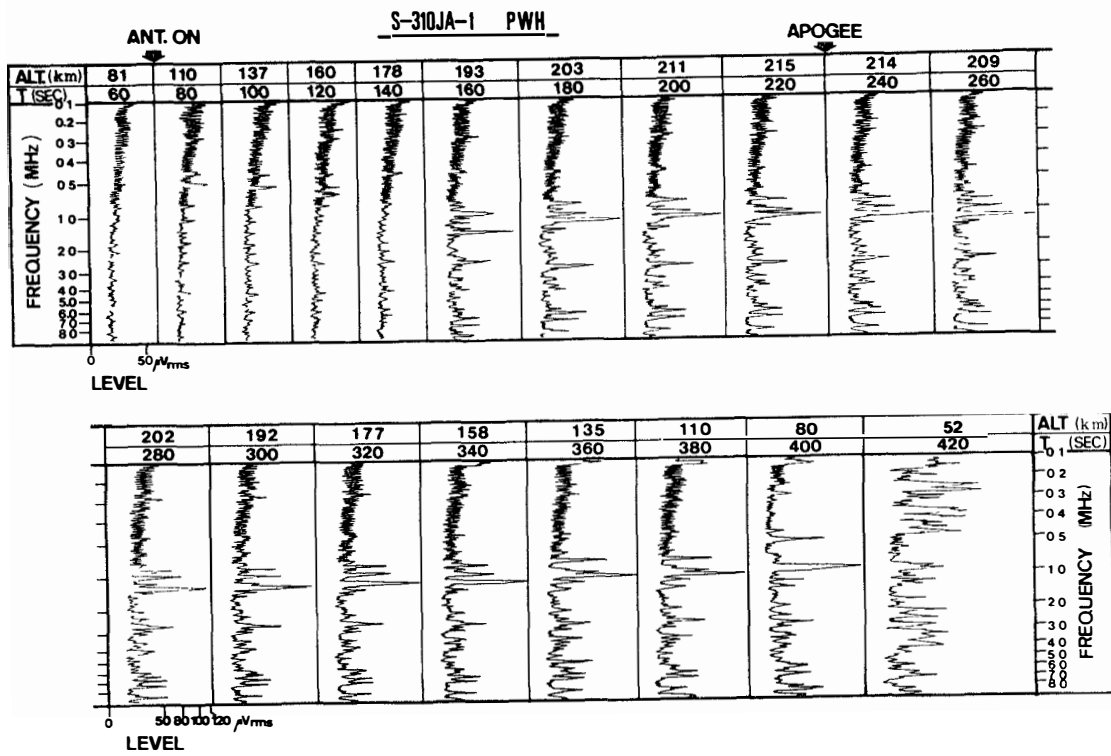


図 3 S-310JA-1 号機で観測された HF 帯電波のアンプリグラム

Fig 3 Ampligram of HF plasma wave emissions observed by S-310JA-1, during total flight interval

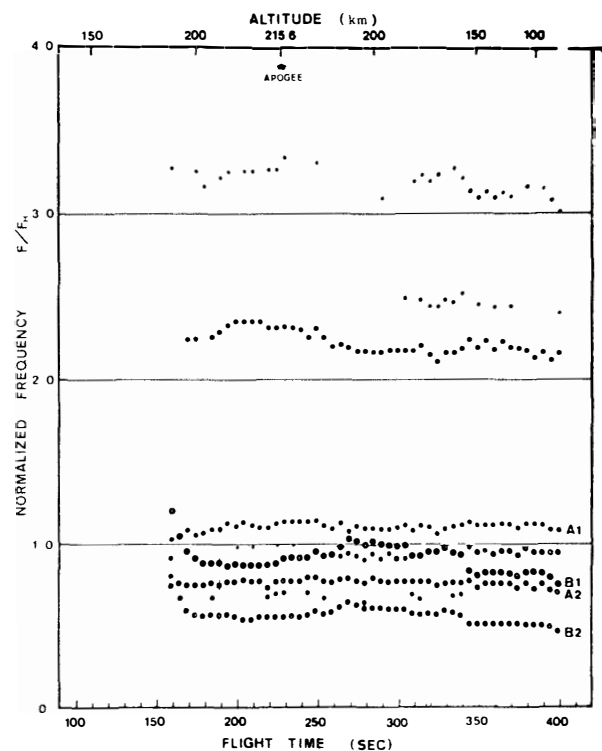


図 4 S-310JA-1 号機で観測された HF 帯電波のスペクトルピーク周波数 (電子サイクロトロン周波数で正規化している)

Fig 4 Peak frequency of the spectrum of HF plasma wave emissions observed by S-310JA-1; the peak points of observed frequency are indicated normalized by the electron cyclotron frequency

1 MHz の低周波側における規則的な振動も機器的原因によるものである。図 2 は、発射後約 190 秒のスペクトルであるが、これを 1 号機の全飛しょう航程にわたってアンプリグラムの形で表示したのが図 3 である。同図によると、エミッションはロケット上昇時、発射後 160 秒 (高度 193 km) で急激に現れ始め、スペクトルは、ほぼ同じ形を保ったまま、下降時の 400 秒 (高度 80 km) 付近まで観測されていることがわかる。すなわち、エミッションの観測された空間領域は、ロケットの到達する最高点を境として上昇時に狭く、下降時に広いものとなっている。このことは、後で見るように粒子降下の状況とよい対応を示している。

図 4 は、全飛しょう区間において観測されたエミッションのピーク周波数を飛しょう径路の電子サイクロトロン周波数で正規化して示している。ただし、明らかに受信機内の非線形歪による成分、およびレベルのセットノイズより小さいものは除いてある。同図によると、図 2 における低周波側で卓越したエミッションは、ほぼ電子サイクロトロン周波数およびそれ以下の周波数帯域に相当し、3 MHz および 4 MHz 近傍のエミッションがそれぞれ $2 < F/F_H < 3$, $3 < F/F_H < 4$ (ここに F_H は電子サイクロトロン周波数) の帯域に含まれることがわかる。特に 3 MHz のエミッションについては、電子密度計測結果から、ほぼ UHR 周波数に一致することが明らかとなった。

3.2. S-310JA-2 号機の観測結果

S-310JA-2 号機は、1977 年 2 月 10 日 3 時 22 分 (45° EMT) に、発射角 80° で方位角 315° の方向に打ち上げられた。最大到達高度は 212 km である。図 5 に 2 号機で観測された HF 帯電波のスペクトルを示す。このうち、6 MHz, 7 MHz および 10 MHz 近傍での鋭いピーク

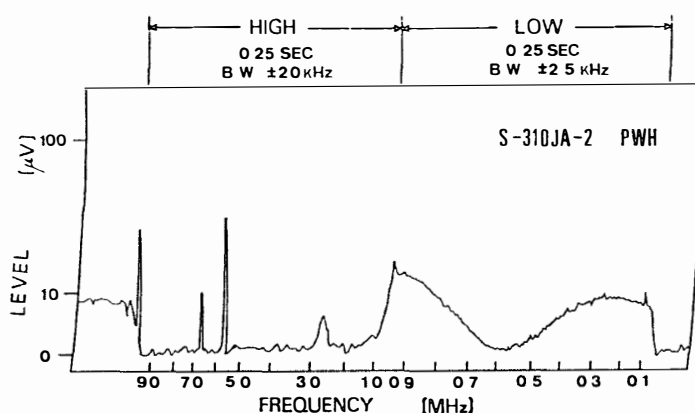


図 5 S-310JA-2 号機で観測された HF 帯電波スペクトル (一掃引分の出力波形を示す)

Fig 5. Spectrum of HF plasma wave emissions observed by S-310JA-2, during one sweep period from 0.1 to 10 MHz

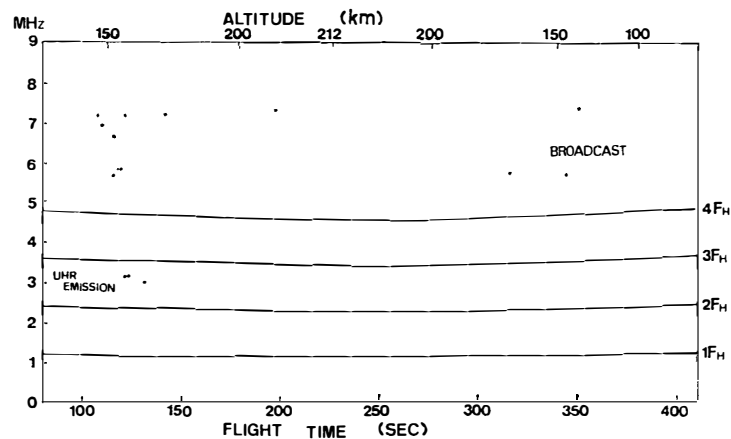


図 6 S-310JA-2 号機で観測された HF 帯電波のスペクトルピーク周波数

Fig 6. Peak frequency of the spectrum of HF plasma wave emissions observed by S-310JA-2

は、地上からの放送波である。2 MHz から 3 MHz にかけて小さなピークが見られるが、これは 1 号機で観測された UHR 周波数近傍にある自然のエミッションに相当する。ただしその強度はかなり小さい。0.1–1 MHz にかけて現れている低周波部の大きなもり上がりは機器的原因によるもので、自然のエミッションはその上に細かく重畳されて存在している。

図 4 と同じく、全飛しょう区間において観測されたエミッションのピーク周波数を示したのが図 6 である。放送波を除くと自然のエミッションとして観測されたものは、 $2 < F/F_H < 3$ の周波数帯にあるもので UHR 周波数近傍のエミッションである。また図 5 に示されるように、2 号機の場合 0.1–1 MHz の低周波部では、機器的雑音が混入するため、図 6 においてはこの帯域のデータは割愛している。

3.3. 粒子観測との対応

S-310JA-1 および 2 両ロケット観測のデータを、同時に搭載している粒子の観測結果と比較してみると、まず 1 号機は、ESL による 2 keV および 8 keV の電子フラックスが計測の開始時から飛しょう時刻 350 秒位まではほぼ単調増加しているのに対し、この HF 帯エミッション強度も同様に単調増加していることが明らかとなった (図 7 参照)。また 2 号機の飛しょう時には、UHR エミッションの観測された飛しょう時刻 120 秒から 170 秒にかけて、やはり 1.14 keV および 1.76 keV の電子フラックスの enhancement があることが ESL によって検出された (図 8 参照)。これは、UHR エミッションの観測とよく対応している。こうした観測結果は、1 号機および 2 号機で観測された波動現象の励起にこれら数 keV のエネルギーレンジの降下電子が寄与していることを強く示唆している。

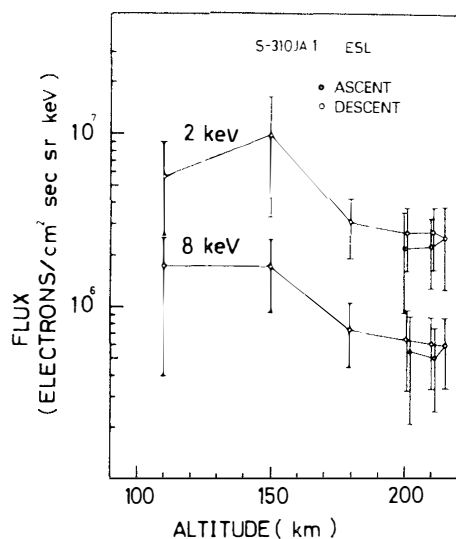


図 7 S-310JA-1 号機に搭載された ESL により観測された降下電子フラックス (伊藤, 久保および村田氏による)

Fig 7 Flux of the precipitating electrons during the rocket flight observed by ESL on board S-310JA-1 (after ITOH, KUBO and MURATA)

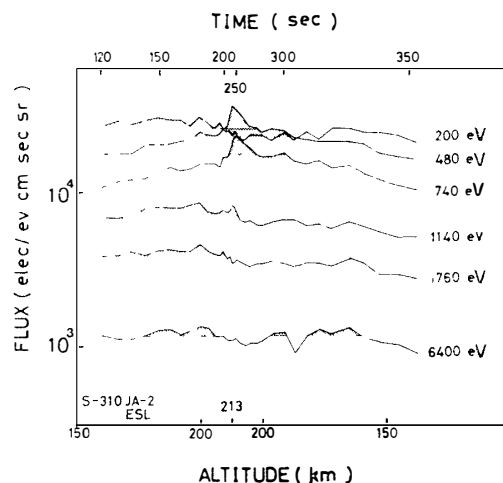


図 8 S-310JA-2 号機に搭載された ESL により観測された降下電子フラックス たたし, ある一定レベル以上のものについてハッチで示している (伊藤, 久保および村田氏による)

Fig 8 Flux of the precipitating electrons during the rocket flight observed by ESL on board S-310JA-2 (after ITOH, KUBO and MURATA)

4. 理論との対比

4.1. ヒーム不安定性

1 号機で観測されたテータについて, その正規化されたエミッション周波数と観測時のプラズマパラメーターに対する静電的電子サイクロトロン (electrostatic electron cyclotron harmonic; ESCH) 波の分散関係を対比させたものが図 9 である. 同図の右の部分には, ESCH 波の分散曲線とともに, Cerenkov 共鳴の条件

$$\omega - kV_B \cos \theta = 0$$

を示す. これは磁力線に対する波の伝搬角 θ をパラメーターとして示しているが, 数 keV のエネルギーに対応したヒーム速度 V_B を選ぶとき, これらが波の分散曲線と交差する点が左の部分 (PWH) に示している観測結果と $\theta \simeq 85^\circ \sim 89^\circ$ に対してよい一致を示している. つまり図 9 の ESCH 波の分散曲線とともに書き込まれている速度 V_B は $100V_{th}$ となっているが, エネルギーとしては $10^4 kT_{th}$ となる. $kT_{th} = 0.2 \text{ eV}$ では 2 keV に相当する. このことは, 1 号機において観測された $2 < F/F_H < 3$ および $3 < F/F_H < 4$ の周波数帯のエミッションは,

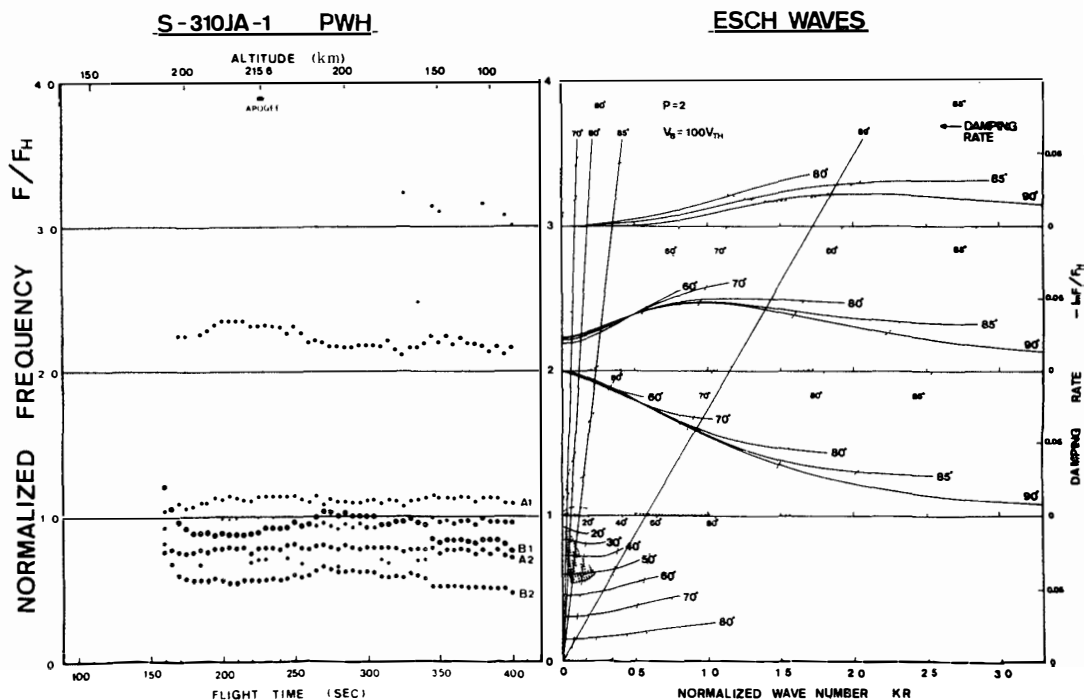


図 9 S-310JA-1 号機で観測された HF 帯エミッションのスペクトルピーク (PWH) と静電的電子サイクロトロン波 (ESCH 波) の分散関係との対比

Fig 9 Comparison of spectrum peak of HF plasma wave emissions (PWH) observed by S-310JA-1 and dispersion relation of electrostatic electron cyclotron harmonic waves (ESCH waves)

波動の波数ベクトル方向が磁力線に対して 90° に近い場合の静電的電子サイクロトロン波モードとして発生し伝搬していることを示唆している。特に $2 < F/F_H < 3$ では、UHR 周波数に近い周波数で顕著なエミッションが観測されているが、これも分散曲線の上からは、 θ が 60° – 85° の場合の静電的電子サイクロトロン波と一致している。

4.2. 低周波領域における非線形現象

1 号機で観測された電子サイクロトロン周波数近傍、およひそれ以下の周波数帯におけるエミッションについては、その励起メカニズムが上述のエミッションと比べてさして明確にはなっていない。しかし理論と対比させてみると、ビーム不安定によるものと温度異方性に伴う不安定によるエミッションの 2 種類が混在している可能性が大きい。分散関係図中、ハッチされている部分は、熱電子の 50 倍の温度で温度異方性 ($T_\perp/T_\parallel = 10$) をもつ高温電子成分が熱電子の 1% の数密度で存在した場合に不安定となる (ω, k) 領域を示しているが、A2 および B2 のエミッションがほぼこの周波数領域内に含まれていることがわかる。

さらに、この 1 号機の電子サイクロトロン周波数近傍のエミッションの特徴は、A1–A2,

および B1-B2 の 2 組がそれぞれほぼ平行な (したがって等しい周波数差をもった) 系列を成していることで、この事実はこれらのエミッションの励起過程において、何らかの非線形波動-粒子、あるいは波動-波動相互作用が関与していることを強く示唆している。

4.3. 電子ビーム密度の効果

図 9 で観測結果 (PWH) と静電的電子サイクロトロン波の分散曲線とを対応するとき、 $1 < F/F_H < 2$ の周波数帯域では、数 keV の電子ビームと分散曲線との交点が存在する (したがって Cerenkov 型共鳴相互作用が起きうる) にもかかわらず、それに対応する実際のエミッションは観測されていない。これは同じエネルギーの電子ビームに対しても、対応する周波数

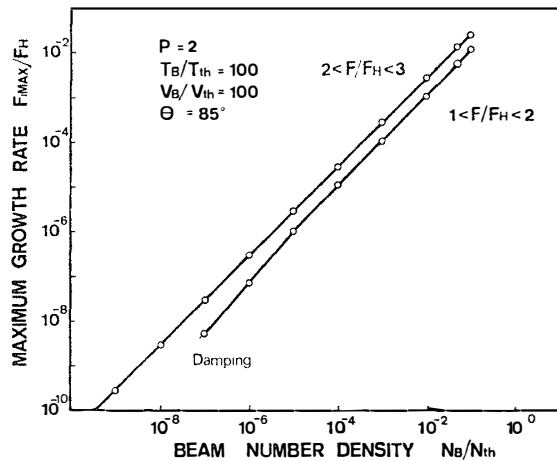


図 10 ヒーム不安定に基づく波の最大成長率の電子ビーム密度に対する依存性. N_B, N_{th} はそれぞれ電子ヒームおよび背景プラズマの数密度で $1 < F/F_H < 2$ および $2 < F/F_H < 3$ の 2 つの周波数帯域について示している。

Fig 10 Maximum growth rate versus the ratio N_B/N_{th} , where N_B and N_{th} are the beam number density and the background plasma number density, two cases for $1 < F/F_H < 2$ and $2 < F/F_H < 3$ are indicated for comparison

帯域で励起されうる波の不安定性の違い、すなわち波の成長率の相違があるためである。図 10 は、約 2 keV のエネルギーで熱電子の 100 倍の温度をもつ電子ヒームが存在するヒーム-プラズマ系における静電的電子サイクロトロン波の成長率を示す。これは背景となる熱電子の数密度 N_{th} に対して相対的な電子ビーム密度 N_B/N_{th} を変数としてプロットしたもので、 $1 < F/F_H < 2$ 、および $2 < F/F_H < 3$ の 2 つの周波数帯域について示している。同図から明らかなように、同じ電子ヒームに対して 2 つの帯域のうち、UHR 周波数を含む $2 < F/F_H < 3$ の周波数帯域の方が波の成長率が大きく、特に電子ヒーム密度が、降下粒子が実際に示す極めて低い密度になっても不安定性を示すのに対し、 $1 < F/F_H < 2$ の帯域では、もはや波は減衰してしまっている ($N_B/N_{th} \leq 10^{-7}$

の場合)。このことは実際観測された現象をよく説明する。

また、1 号機と 2 号機とて、ESL により観測された数 keV レンシの電子フラックスを比較した場合、2 号機の飛しょう時の方が 1 号機飛しょう時より少ないことが明らかにされている。2 号機の飛しょう時には HF 帯電波でも、顕著なエミッションが観測されなかったの

は、一つには、この電子フラックスの違いにより、2 号機の場合波動励起の限界以下にあったことによると結論される。

このように、観測された HF 帯電波スペクトルをビームプラズマ系の不安定性について行った計算結果と比較するために、最終的には観測された粒子の分布関数を計算に取り入れてやる必要があるであろう。しかし、以上のように比較的簡単にモデル化されたビームプラズマ系の不安定性の数値計算結果からも、実際に観測されたスペクトルを十分説明できることがわかり、波動-粒子相互作用が極域電離層の粒子降下領域において、基本的な役割を果たしていることが分かる。

5. 磁気嵐との関連

図 11 および図 12 にそれぞれ 1 号機および 2 号機発射時の地上（昭和基地）における磁場変動記録を示す。1 号機の場合、図 11 からわかるように、およそ 9 時間前に起こったサブストームに伴う磁気嵐が完全に回復したフェイズであり、地磁気の上からは静穏な時期であった。一方、2 号機の場合は、図 12 から明らかなようにサブストームの expansion phase に発射され、diffuse aurora 中に打ち込まれた模様である。

ところが 1 号機においては、地磁気静穏時にもかかわらず多くのエミッションが観測された。これは、同乗している ESL のデータからも、数 keV レンジの電子が多く降下しているという事実と対応している。さらに同時に搭載された VLF 受信機 (PWL) および地上での観測にも多くのコーラスエミッションが受信されていることとも対応していて、これは、サブ

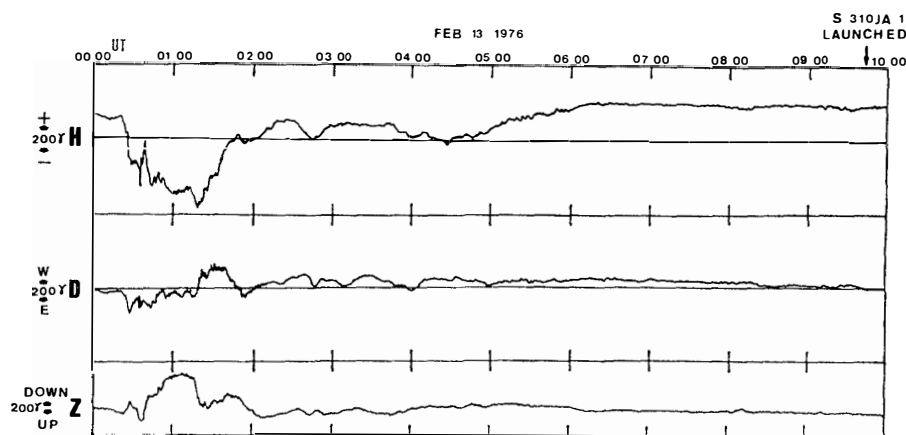


図 11 S-310JA-1 号機発射時における磁場変動記録 (昭和基地)

Fig. 11. Magnetogram covering the period of the rocket flight S-310JA-1 observed at Syowa Station

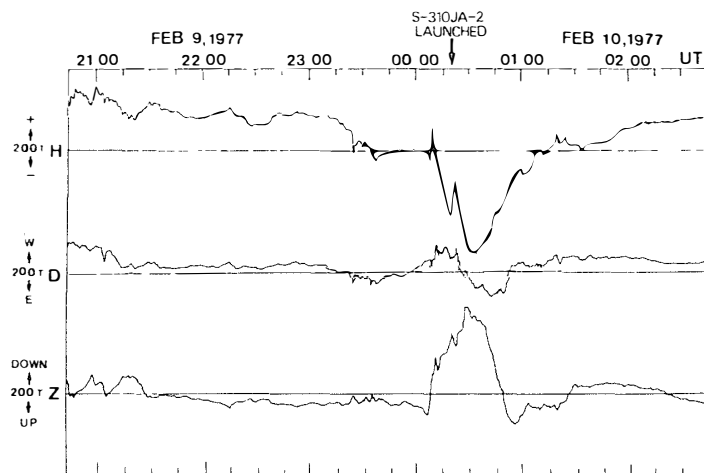


図 12 S-310JA-2 号機発射時における磁場変動記録 (昭和基地)

Fig 12 Magnetogram covering the period of the rocket flight S-310JA-2 observed at Syowa Station

ストームに伴って地球内側に向かって住入された粒子群で、朝側にドリフトしてきた成分の電子が、静電的電子サイクロトロン波 (LYONS, 1974) およびホイスラーモード波 (FOSTER and ROSENBERG, 1976) との間で波動-粒子相互作用を生じた結果、ピッチ角散乱を受け、数 keV ~ 数 10 keV の降下電子フラックスを多くしていると考えられる

一方、2号機の飛しょうした時も、1号機の場合と同様な UHR エミッショョンが認められる。特に UHR 周波数付近のエミッショョンは、64 keV のエネルギーで 10^8 (elec/eV \cdot cm 2 \cdot sec \cdot sr) を越えている時とほぼ一致している

ところで、1号機の場合のように、電子サイクロトロン周波数より低い周波数領域のエミッショョンが観測されなかったのは、この周波数領域の装置内雑音が高く S/N 比が大きく低下していたためと結論される (図 5 参照)。

今回、2機のロケット観測により、地磁気活動度が対照的に異なる場合における HF 帯電波スペクトルが観測され、それぞれ対照的な観測結果を与えたわけであるが、これはサフストームの種々のフェイズと降下粒子の状況およびそれに対応する電波スペクトルとの関連を明らかにする一連のデータで、極域における波動-粒子相互作用を明らかにする上で重要なものである。今後、観測を積み重ねることにより解明していく必要がある

6. 結 論

第 17 次および第 18 次南極観測隊により打ち上げられた S-310JA-1 号機および 2 号機により観測された HF 帯電波スペクトルを解析した結果、次の諸点が明らかとなった。すなわ

ち,

1) HF プラズマ波エミッションは, 飛しょう径路に沿って, 遠地点に対して非対称な空間領域で観測されたが, これは電子の降下域の空間分布と一致している (S-310 JA-1 号機の場合).

2) 観測されたエミッションのうち, 電子サイクロトロン周波数以上の帯域のものは静電的電子サイクロトロン波であることが判明した. その励起機構としては, 数 keV のエネルギーをもった降下電子によるヒーム不安定が有力である (1 号機の場合).

3) 電子サイクロトロン周波数近傍, およびそれ以下の周波数帯域に, 非線形現象と考えられる特徴的なエミッションが観測された (1 号機の場合).

4) 降下電子フラックスが少ない場合には, UHR 周波数近傍を除いてはエミッションは観測されず, ビーム不安定性の計算結果と一致する (2 号機の場合).

5) 1 および 2 号機は, 地磁気活動度の上からは, 対照的な条件時に発射され, それぞれの場合の HF 帯電波スペクトルの様相を明らかにすることができた.

以上, 今回南極域で初めて行われた HF 帯電波スペクトルのロケット観測により, いくつかの新事実が明らかになってきたが, 今回得られた結論に確証を与えるためにも, 極域電離圏における波動-粒子相互作用の総合的解明を目指した今後の南極ロケット観測計画の進行が大きく期待される.

謝 辞

南極ロケット観測の機会を与えていただいた国立極地研究所, および実際打ち上げの労をとっていただいた第 17 次および第 18 次南極観測隊に対し, 厚く感謝の意を表したい. また, 昭和基地における磁場, 脈動相関データを提供していただいた国立極地研究所福西浩助教授に感謝する.

文 献

- FOSTER, J. C. and ROSENBERG, T. J. (1976) Electron precipitation and VLF emissions associated with cyclotron resonance interactions near the plasmapause. *J. Geophys. Res.*, **81**, 2183-2192.
- LYONS, L. R. (1974) Electron diffusion driven by magnetospheric electrostatic waves. *J. Geophys. Res.*, **79**, 575-580.

(1978 年 6 月 15 日受理)