

南極ロケット S-210JA-21 号機による高周波 プラズマ波動スペクトルの観測

大家 寛*・宮岡 宏*・宮武貞夫**

Observation of HF Plasma Wave Spectrum at Ionospheric Level
Using Sounding Rocket S-210JA-21 in Antarctica

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

Abstract: An observation of the plasma wave spectrum in a high frequency range from 0.1 to 10 MHz has been made using the ionospheric sounding rocket S-210JA-21, launched on July 26, 1976 from Syowa Station in Antarctica. Plasma wave emissions were observed in two frequency ranges; the first range is from the UHR frequency to the Z-mode cut off frequency, and the second is a range lower than the electron cyclotron frequency. The center frequency of the first kind emissions indicates a variation corresponding to the local upper hybrid and to the electron plasma frequencies along the flight path of S-210JA-21, indicating an evidence that the emissions are produced in the ionosphere as a result of the wave-particle interaction due to the auroral precipitation particles. The intensity of the second type emissions has been changed in correlation with the electron flux in the 40–60 keV range that is observed by ESH simultaneously. It has been clarified that the second kind emissions are plasma waves of the electrostatic origin which are also excited at the lower ionospheric level by the electrons precipitating along the auroral field line.

要旨: 南極ロケット S-210JA-21 号機に搭載された PWH により、南極域電離層における高周波帯プラズマ波動スペクトルの観測が行われた。その結果、ロケット近傍での UHR 周波数から Z モードしゃ断周波数にかけての帯域、および電子サイクロトロン周波数以下、の 2つの帯域において顕著なエミッションが観測された。

前者のエミッションでは、その周波数変動が電離層電子密度の分布構造をよく反映しており、このエミッションが比較的ロケット近傍で励起されたものであることを示す。また後者のエミッションも同時に観測された降下電子フラックスと対応しており、これらのエミッションが極域電離層に降り込む降下粒子との波動粒子相互作用の結果、下部電離層レベルにおいて励起されたプラズマ波動であることが判明した。

* 東北大学理学部。 Geophysical Institute, Tohoku University, Aramaki Aoba, Sendai 980.

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

1. 序

近年，衛星によるプラズマ波動の直接観測が磁気圏全域に渡って行われるようになったが，磁気圏プラズマが非平衡でしかも熱い磁化プラズマであることを反映して，そこには多種多様の波動モードが存在することが明らかになりつつある．特に，オーロラオーバルに直結した磁力線に沿う領域においては，沿磁力線方向に降り込む降下粒子群により，数十 Hz から数百 kHz に渡る広範囲の周波数帯域においてプラズマ波動が励起されている (GURNETT, 1974; GURNETT and FRANK, 1977; OYA, 1979; MORIOKA *et al.*, 1979)．そしてこれら高度数千 km の極域磁気圏における波動粒子相互作用がオーロラサブストームの発生に対してきわめて本質的な寄与をしているとの認識が固まりつつある．

我々は，これまでの衛星観測では観測し得なかった高度 100 km 前後の電離層レベルにおける高周波領域 (100 kHz-10 MHz) のプラズマ波動スペクトルを観測し，そこにおける波動粒子相互作用を解明する目的で，南極ロケットによる観測を行ってきた．今回，S-210JA-21号機による観測でこの領域における波動粒子相互作用を反映した明瞭な波動スペクトルが観測されたので，これについて以下報告する．

2. 観測 システム

S-210JA-21 号機に搭載された高周波帯プラズマ波動スペクトル観測器 (PWH; plasma wave in high frequency range) のブロック図を図 1 に示す，この観測器では，100 kHz-10 MHz に達する周波数領域のスペクトルを 2 周波帯 (100 kHz-1 MHz および 1 MHz-10 MHz) に分離してそれぞれ 250 ms で掃引計測する．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ダイポールアンテナに接続している．

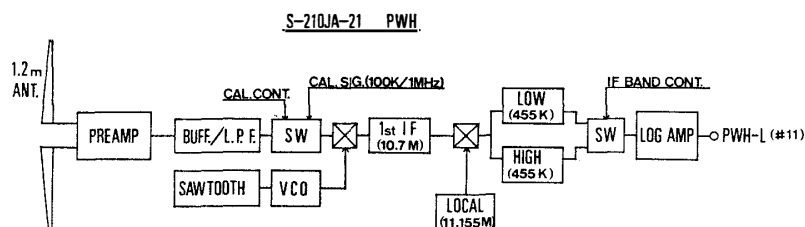


図 1 S-210JA-21 号機に搭載された PWH のブロック図
Fig. 1. Block diagram of PWH system on board S-210JA-21.

3. 観測結果

3.1 ロケット発射時の状況

S-210JA-21 号機は、1976年7月26日3時23分 (45° EMT), 昭和基地より発射上下角 82°, 方位角 315° で打ち上げられ、最高到達高度は 115.8 km に達した。ロケット発射時における地磁気は -40γ (H 成分) 程度の弱いじょう乱の最中で、ロケットは diffuse a urora の低緯度側の端に打ち込まれている。同時に地上では、弱い hiss が観測された。

3.2 飛しょう経路におけるプラズマパラメーター

図2に S-210JA-21 号機の飛しょう軌道、および飛しょう経路に沿った高域混成共鳴周波数 (UHR 周波数, 以下 F_{UHR}), 電子プラズマ周波数 (F_P), $L(Z)$ モードカットオフ周波数 ($F_{L=0}$), および電子サイクロトロン周波数 (F_H) の各特性周波数の変化を示す。ここに F_P は同時に搭載された電子密度測定器 (NEL) による観測結果から求め、また F_H は IGRF 1975 モデルに基づく計算結果を使っている。 F_{UHR} および $F_{L=0}$ はこれら F_P , F_H を基に次式から求めることができる。

$$F_{UHR} = (F_P^2 + F_H^2)^{1/2} \quad (1)$$

$$F_{L=0} = (F_P^2 + F_H^2/4)^{1/2} - F_H/2. \quad (2)$$

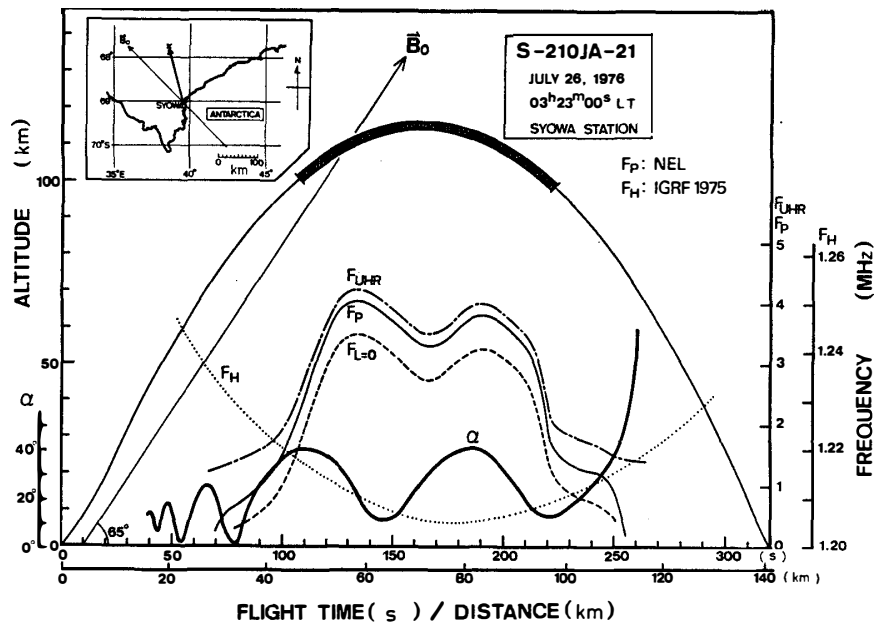


図2 S-210JA-21 号機の飛しょう軌道および飛しょう経路におけるプラズマ特性周波数
 Fig. 2. Trajectory and plasma characteristic frequencies along the flight path of S-210JA-21.

Apex 近傍で F_{UHR} , F_P , $F_{L=0}$ は、ほぼ 3 MHz から 4 MHz の間、また F_H は、1.2 MHz 程度であり、これらのプラズマ特性周波数は、PWH の観測周波数帯域内に十分含まれる。また図 2 には、ロケット軸が磁力線となす角 α の変化を同時に示している。飛しょう軌道上、太線で示す範囲は PWH によって顕著なプラズマ波動現象が観測された領域で、ほぼ高度 100 km 以上に限定されている。

3.3 観測されたプラズマ波動のダイナミックスペクトル

アンテナ展開からふたたび大気圏に入るまでの 200 秒間において、PWH により観測されたプラズマ波動の 10 秒毎のスペクトル変動を図 3 に示す。それぞれのコラムで縦軸は 100 kHz から 10 MHz まで掃引された周波数で、横軸は電界強度レベルをとっている。

図 3 によると上昇時アンテナ展開直後から高度約 100 km までの間、および下降時高度 100 km 以下の区間で 6–10 MHz に渡る周波数帯域に地上放送波が受信されているが、100 km 以上では、これらは電離層によるしゃ断を受け消える。それとともに、400 kHz から 800 kHz にかけて広帯域のエミッションが受信され始める。この広帯域エミッションは、特に

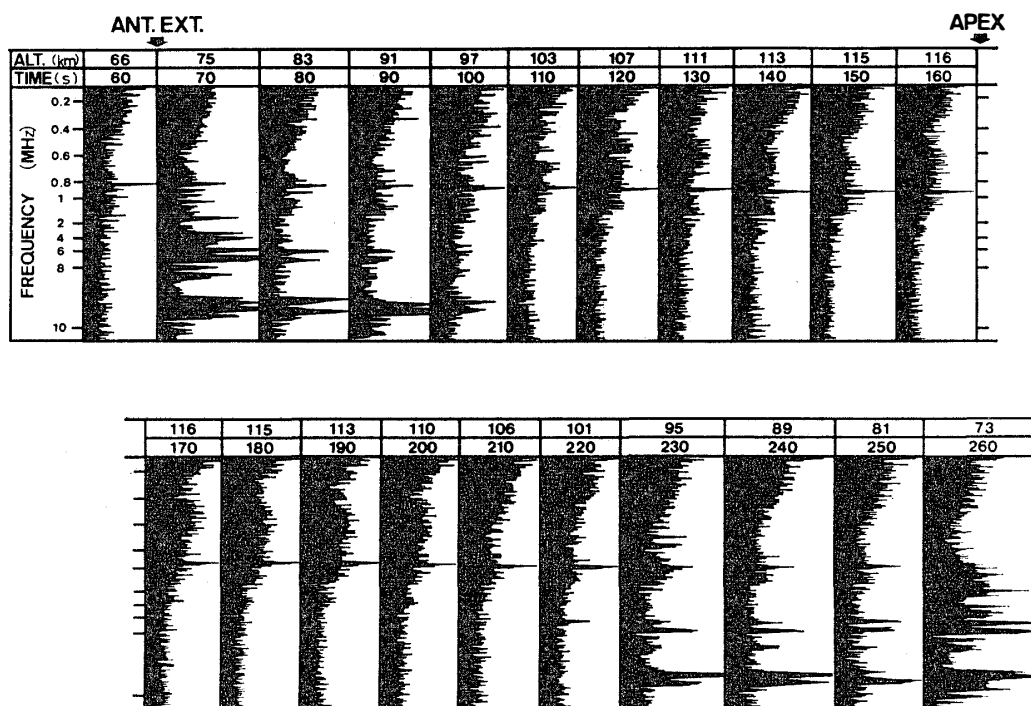


図 3 S-210JA-21 号機で観測された高周波プラズマ波動のアンプリグラム
Fig. 3. Ampligrams of HF plasma wave emissions observed on S-210JA-21.

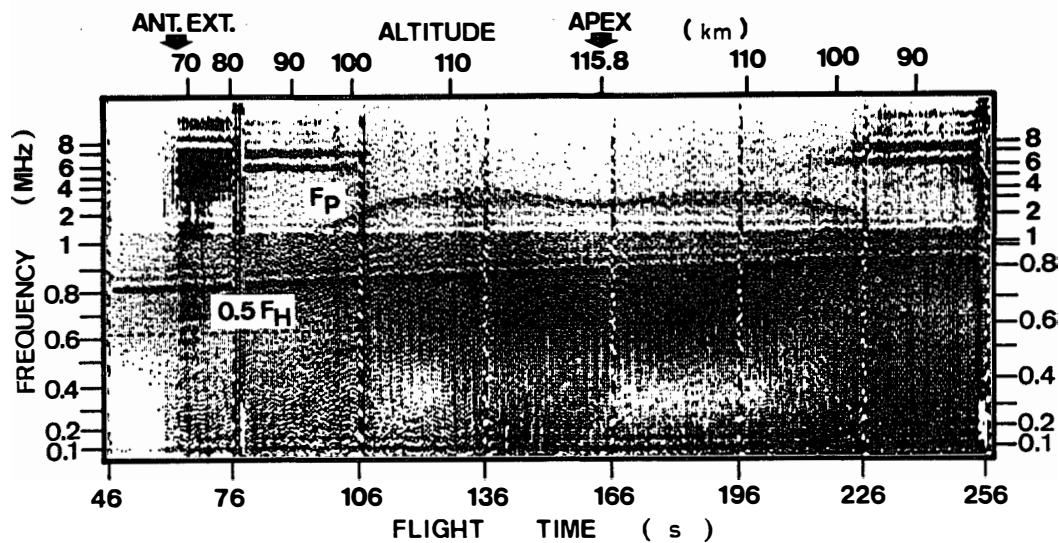


図 4 S-210JA-21 号機で観測された高周波プラズマ波動のダイナミックスペクトル
 Fig. 4. Dynamic spectrum of HF plasma wave emissions observed on S-210JA-21.

apex 近傍で顕著に観測されており、明らかに電離層レベルで発生する波動粒子相互作用に基づく自然のエミッションであると考えられる。さらにこれを詳細に検討するため、それぞれのスペクトルに対してアンテナ展開前の background レベルを差し引いた上で、ダイナミックスペクトルの形に処理をした結果を図 4 に示す。なお、800 kHz 近傍の定常的なピークは機器内部の干渉ノイズである。

図 4 において、周波数 1 MHz 付近で掃引の帯域切替を行っているため、100 kHz-1 MHz と 1 MHz-10 MHz の周波数範囲との間で若干濃淡差がある。また低周波側では、局部発振周波数が温度変化とともにわずかに変化するため、掃引周波数も全体的にドリフトしている。このダイナミックスペクトルから S-210JA-21 号機の場合、約 800 kHz の搭載機器内の干渉ノイズと地上放送波とを除くと、次に示す 3 つのタイプのプラズマ波動が観測されている。

3.3.1. Type I

2-4 MHz の周波数範囲にある比較的狭帯域なエミッションで同時に搭載された NEL より求まる F_P (点線) にほぼ一致している。したがって、apex に対してほぼ対称な double peak をもつ周波数変動は、電離層電子密度の空間分布を反映しており、このエミッションは比較的ロケット近傍で励起されたプラズマ波動であると考えられる。

3.3.2. Type II

400-800 kHz の周波数領域に広がる広帯域エミッションで Type I と同様、高度約 100 km

以上の領域で観測されている。電子サイクロトロン周波数に対しては、ほぼ $0.4 < F/F_H < 0.6$ の周波数領域内にある（図中 $0.5 F_H$ を点線で示す）。電子密度がピークをもつ 136 秒および 196 秒付近でエミッションの帯域幅が広がりその強度も大きくなる。逆に apex 近傍では、帯域幅は狭まり強度も小さくなっている。また 106–136 秒の間で周期 2 秒程度の櫛歯状の modulation が見られる。ただしこの modulation 周期は、136 秒以降においては必ずしも一定ではない。

3.3.3. Type III

Type I, II ほど明瞭ではないが時刻 130–166 秒および 196 秒以降に約 400 kHz 以下の周波数帯域で観測されるエミッションでその高周波側は Type II エミッションに連続している。

3.4. 粒子観測との対応

図 5 に PWH により観測された Type I, II エミッションのレベル変動 (a)、およびダイナミックスペクトル (c) と、同時に搭載された ESH により観測された降下電子フラックス (b) とを対比させて示す。なお図 5 b はエネルギー範囲 40–60 keV (ESH の最低エネルギーチャンネル)、ピッチ角 75° をもつ降下電子のフラックスである。図 5 a および b を比較すると Type I エミッションのレベル変動が降下フラックスとほとんど相関がないのに対して、Type II エミッションは細かな変動を除いて、その background level の変動は降下フラックスの全体的な増減と比較的良く対応している。

Type III エミッションについては、図 5 b と c とを比較すると時刻 130–166 秒におけるエミッションでは降下フラックスが減少しているのに対し、196 秒以降のエミッションでは、逆にフラックス増加時に対応しており降下粒子との関係は不明瞭である。むしろ Type III エミッションの出現は、図 5 b に示したロケットスピン軸と磁力線とがなす角 α が減少した時に一致しており、磁力線に対するロケット姿勢が Type III エミッションに密接に関係している。

ここでは、40–60 keV に渡る比較的エネルギーの高い降下粒子との比較を行った。次節で行うが、波動粒子相互作用の理論的検討から、観測された各エミッションの励起には数 keV 程度のエネルギーをもつ降下粒子が直接関与しているものと考えられ、したがって図 5 に示すエミッションと 40–60 keV の降下粒子との相関があまり良くない理由の 1 つは、降下粒子のエネルギーが異なるためと考えられる。今回の観測では、数 keV の降下電子フラックスを観測する装置は搭載されていないため、このエネルギー範囲の降下粒子との相関については、議論できない。

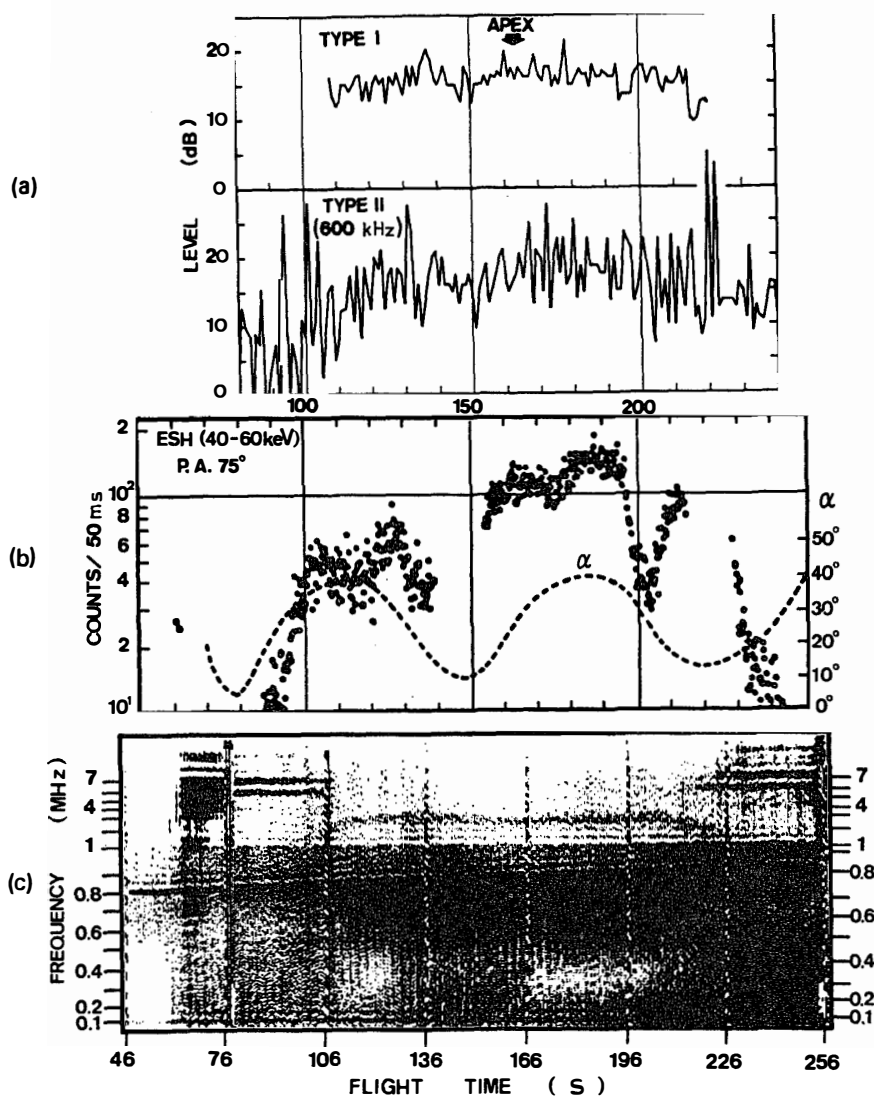


図 5 S-210JA-21 号機により観測されたプラズマ波動と同時に観測された電子フラックスとの対比.

(a) Type I および Type II エミッションのレベル変動.

(b) ESH により観測された電子フラックス (エネルギーレンジ 40-60 keV, ピッチ角 75°). α はスピン軸と磁力線とのなす角.

(c) 高周波プラズマ波動のダイナミックスペクトル.

Fig. 5. Comparison of HF plasma wave emissions (PWH) and electron flux (ESH) simultaneously observed on S-210JA-21.

(a) Intensity level of Type I and Type II emissions.

(b) Electron flux observed by ESH (40-60 keV for energy range and 75° for pitch angle). α is an angle between the rocket spin axis and the geomagnetic field line.

(c) Dynamic spectrum of HF plasma wave emissions.

4. 波動励起機構の検討

前節における粒子観測との対応を踏まえ、本節においては Type I, II, III の各エミッションの生成メカニズムを検討する。

4.1. Type I エミッション

図4に示される通り、Type I エミッションはロケット飛しょう経路に沿う電子プラズマ周波数にほぼ近い周波数をもっているが、その周波数関係についてより詳しく解析した結果を図6に示す。すなわち、図6では飛しょう経路に沿った F_{UHR} , F_P , および $F_{L=0}$ の各特性周波数に対し、観測された Type I エミッションの帯域幅（縦のバー）を示している。高度約 100 km 以上の全区間でエミッションは、ほぼ $F_{L=0} < F < F_{UHR}$ の帯域内に含まれており、エミッションの周波数変動は、高度差数 km 程度の電子密度構造をよく反映している。

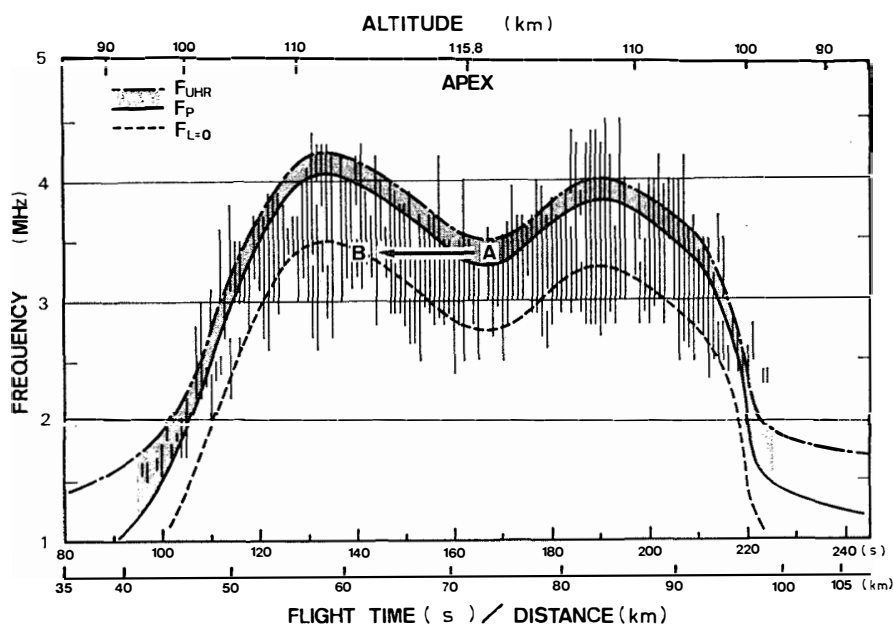


図6 Type I エミッションの帯域幅および F_{UHR} , F_P , $F_{L=0}$ 各周波数との関係。Apex 付近の A 点において $F_P < F < F_{UHR}$ の帯域（ハッチした領域）内で発生した upper hybrid モード波は、下方に伝搬して B 点に達すると Z モードの遮断周波数 ($F_{L=0}$) に一致する。

Fig. 6. Bandwidth of Type I emission and its relationship to F_{UHR} , F_P , and $F_{L=0}$ frequencies. The upper hybrid mode wave excited in the frequency range $F_P < F < F_{UHR}$ (shaded area) near the apex of the flight path (point A) can propagate downward, and reaches point B, where the wave frequency coincides with the Z mode cut off frequency ($F_{L=0}$).

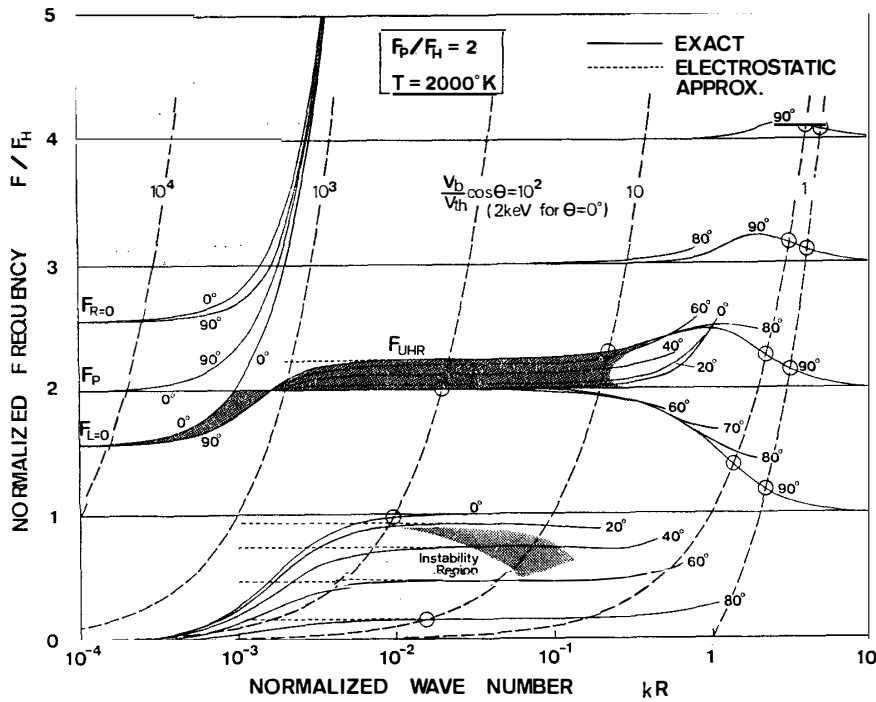


図 7 磁化プラズマ中におけるプラズマ波動の ω - k ダイアグラム

Fig. 7. ω - k diagram of plasma waves propagating in warm magnetoactive plasma.

この F_{UHR} , F_P 周波数近傍における波動粒子相互作用の様相は、図 7 に示す ω - k ダイアグラムで明確に把握することができる。すなわち、図 7 は $F_P/F_H=2$ 、電子温度 2000 K の磁化プラズマ中における波動分散関係を温度効果も含めた取り扱い (STIX, 1962) で計算した分散曲線である。また破線で、

$$\omega \cdot \mathbf{k} \cdot \mathbf{V}_0 = n \Omega_e \quad (n=0, \pm 1, \pm 2, \dots) \tag{3}$$

の Landau 型および cyclotron 型共鳴相互作用条件を粒子エネルギーをパラメータとして示している。ここに Ω_e は電子サイクロトロン角周波数である。すなわち、 F_{UHR} から F_P にかけての周波数帯域は、広いエネルギー範囲の降下電子との間で共鳴条件を満たし得るが、 F_P から $F_{L=0}$ の周波数帯域は、 $\omega/k \geq c$ (c は光速) の領域に含まれるため、もはや Landau 型相互作用は不可能となる。したがって、降下粒子による直接的な波動励起が許されるのは、 $F_P < F < F_{UHR}$ の周波数帯域である。

実際に、この帯域における波動粒子相互作用について、背景プラズマに対して 10^{-4} の数密度をもつ電子ビーム (降下電子成分) が存在する場合における波動の成長率を計算した結果が図 8 である。波動の \mathbf{k} ベクトル方向をパラメータとして 85° から 20° まで示している。

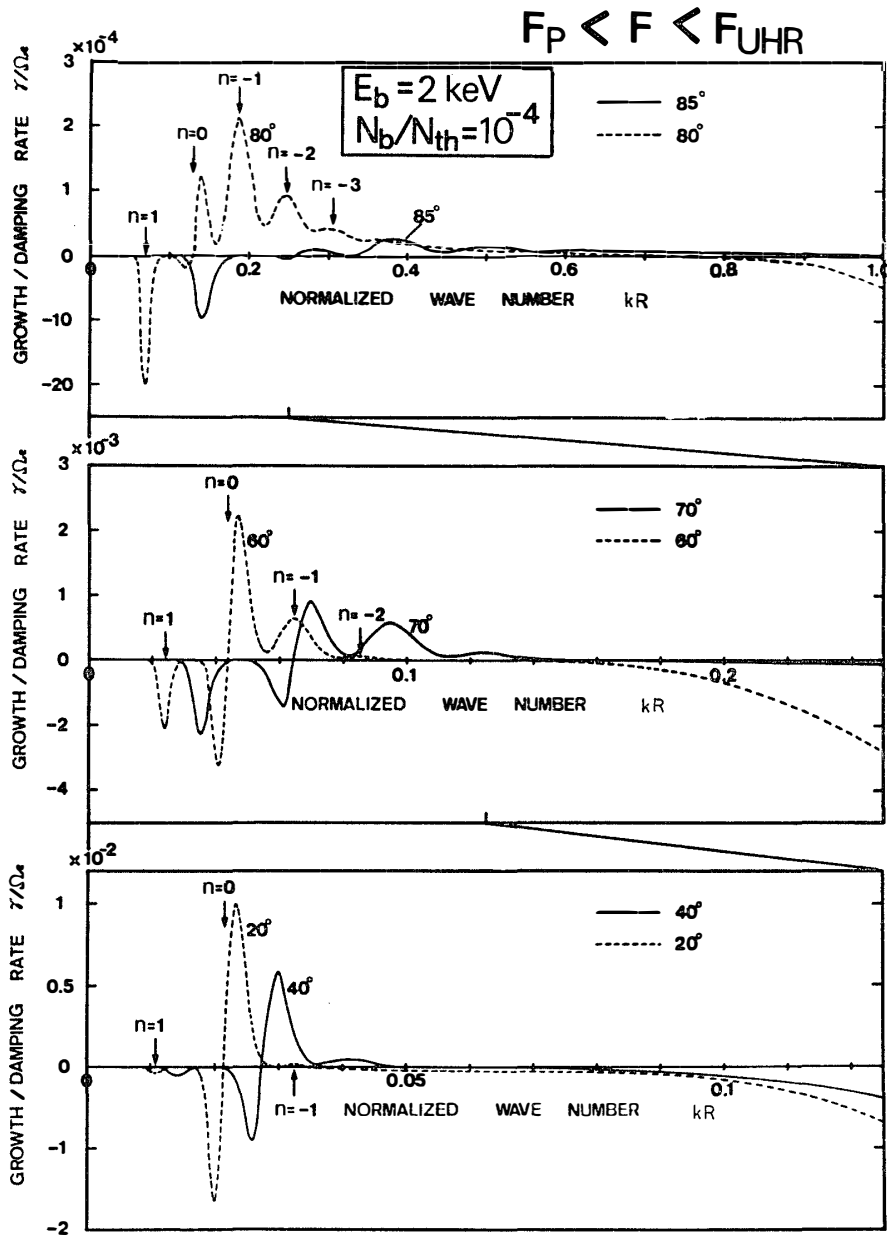


図 8 ビーム不安定による静電的プラズマ波動の成長率 ($F_P < F < F_{UHR}$). 電子ビームのエネルギーは約 2 keV でその密度は背景プラズマの 10^{-4} .

Fig. 8. Growth rate of electrostatic plasma waves due to the beam instability by the electron beam with the energy of 2 keV and the number density whose ratio to background plasma is 10^{-4} .

が、それぞれ Landau 型共鳴条件 (式 (3) で $n=0$) および cyclotron 型共鳴条件 (式 (3) で $n=\pm 1, \pm 2, \dots$) を満たす波数領域において、実際に波が成長し得ることが明らかとなっている。

ところで、観測された Type I エミッションの帯域は、図6に示す通り、各々の高度において、ほぼ $F_{L=0}$ から F_{UHR} にわたる周波数範囲に広がっている。しかしこの周波数帯域で直接電磁波を発生するには、相対論的エネルギーをもつ粒子が必要である。この場合、オーロラを励起する降下粒子は、たかだか数 keV から 10 keV の範囲にあり、おもに励起されるものは、 $F_P < F < F_{UHR}$ の範囲の upper hybrid モード波である。つまり、いったん $F_P < F < F_{UHR}$ の帯域（図6においてハッチした領域）に励起された静電的性格をもつプラズマ波動が、ロケットの位置においては、 $F_{L=0} < F < F_P$ の電磁波モード（Zモード波）に変換されていることを示す。たとえば、図6のA点で示す領域（apex付近）で発生した $F_P < F < F_{UHR}$ の帯域にある upper hybrid モードの波は、発生領域から下方に伝搬するに従い、 $F_{L=0} < F < F_P$ の帯域内に含まれ始め、鉛直距離にして約 5 km 下方に伝搬したB点において、 $F_{L=0}$ に一致し、Zモード波として反射される。Type I エミッションの帯域が $F_{L=0} < F < F_{UHR}$ の範囲に広がっているのは、以上のようなプロセスで説明することができるが、この upper hybrid モード（静電波モード）から電磁波モードへの変換は、媒質が非一様である場合に起きる基本的現象の1つであり、惑星プラズマ圏内で発生する電磁波放射の発生メカニズムとして重要な役割を果たしている (OYA, 1971, 1974)。

4.2. Type II エミッション

Type II エミッションは前節でみた通り、ほぼ $0.4 < F/F_H < 0.6$ の周波数帯域をもった continuous なエミッションで ESH の降下粒子フラックスと比較的対応が良い。このエミッションの生成機構に関しても、直接関与していると考えられる数 keV 範囲の降下電子の観測がないため明確な結論を下すことは困難であるが、次の理由で、loss cone 分布ないしは温度異方性分布をもった降下電子（～数 keV）群により励起された F_H 以下の静電波モード（以下 ESLC; electrostatic wave lower than electron cyclotron frequency）であると考えられる。

すなわち、図7の ω - k ダイアグラムから数 keV-数十 keV の電子ビームによるビーム型不安定性では、波動粒子相互作用を行う周波数領域が F_P 近傍では、 $F_P < F < F_{UHR}$ であるのに対し、 F_H 以下では $0 < F < F_H$ のほぼ全帯域で相互作用を行う。したがってそれに伴う波の成長率も必ずしも $F \approx 0.5 F_H$ 近傍で最大値をもたず、観測結果をうまく説明できない。

それに対し、loss cone 分布あるいは温度異方性型分布等の一般に磁力線に垂直方向に卓越した速度分布をもつプラズマ中では、 $F \approx 0.5 F_H$ 近傍で不安定領域が存在することが知ら

れている (YOUNG, 1974; KARPMAN *et al.*, 1975). 図7において F_H 以下でハッチした領域は、温度異方性 $T_{\perp}/T_{\parallel}=10$ (ここに T_{\perp} , T_{\parallel} はそれぞれ磁力線に垂直および平行方向の温度) をもつ成分が全体の1%の数密度で存在した場合不安定となる (ω, k) 領域を示している. このようにこのタイプの不安定性では、 $F \approx 0.5 F_H$ 前後に不安定領域が現れ Type II エミッションのスペクトルとよく一致する.

実際に ESH で観測された降下電子の pitch 角分布は、その観測範囲 50° – 130° に対し 60° – 80° 付近にピークがあり、loss cone 型ないしは温度異方性型の傾向を示している.

4.3. Type III エミッション

図5に関連して指摘したように、Type III エミッションでは、降下粒子との明確な対応関係は見られず、むしろ角度 α の減少時、すなわちロケット軸方向が磁力線方向とほぼ平行になった場合に対応している. このエミッションの励起機構として考えられるのは、まず1つは、エミッションが観測された時刻に数 keV 程度のエネルギーをもつ多量の粒子降下があり (観測器は搭載されていないが)、これによるビーム型不安定が生じた結果、 $F < F_H$ において広帯域の ESLC モード波が励起された可能性があげられる. しかし Type I エミッションには、Type III エミッションと同期した明確なレベル上昇が見られず (図5参照)、観測結果を矛盾なく説明することはできない.

次に第2の可能性として、ロケット姿勢の変動に伴い Type III エミッション出現時には、アンテナの受信特性が、特に低周波側でピークをもつようになったことがあげられる. すなわち、図9に示す通りロケットがスピンの間にダイポールアンテナと磁力線とのなす角 β は、次式の通り変化する.

$$\beta(t) = \cos^{-1}(\sin\alpha \cdot \sin\omega t) \quad (4)$$

ここに ω はスピン角周波数である. 1スピンの間では、 $0 \leq |\sin\omega t| \leq 1$ であるから、 β のとり得る範囲は、

$$\cos^{-1}(\sin\alpha) \leq \beta(t) \leq 90^{\circ} \quad (5)$$

である. 図10は、apex 付近におけるこの β の範囲を示したもので縦線でハッチした領域がそれである. ところで、今 ESLC モードが受信されているとすると、その受信特性はアンテナ方向 (β) と k 方向 (θ) とが一致した場合に最大となる. ESLC モード波の分散関係は、冷たいプラズマの近似として次式で与えられる.

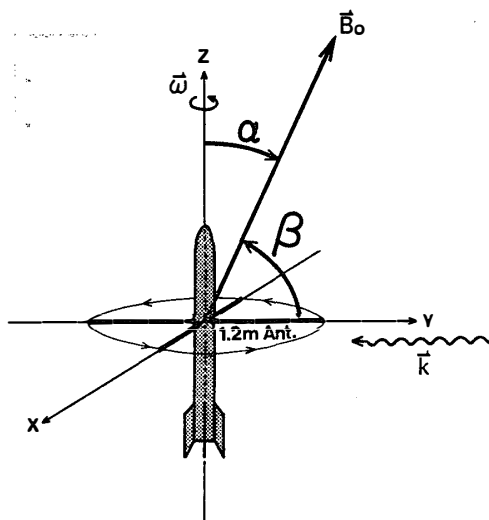


図 9 ダイポールアンテナ, スピン軸および磁力線方向の関係. α : スピン軸と磁力線とのなす角. β : ダイポールアンテナと磁力線とのなす角.

Fig. 9. Geometry of the dipole antenna, the rocket spin axis and the geomagnetic field line. α : Angle between the rocket spin axis and the geomagnetic field line. β : Angle between the dipole antenna and the geomagnetic field line.

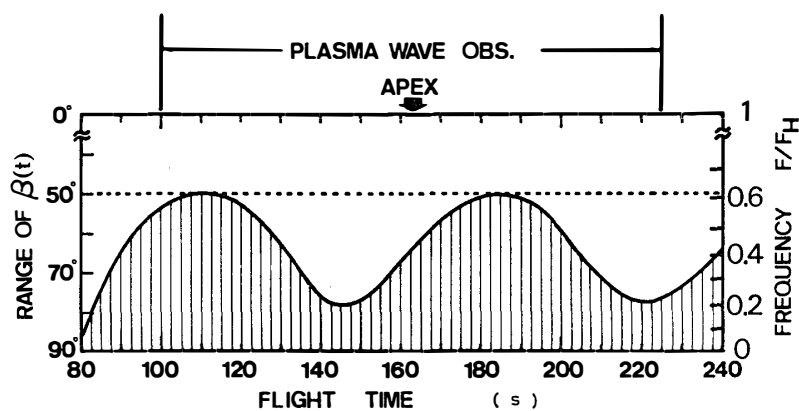


図10 β の存在範囲およびそれに対応して受信効率が最大となる周波数領域の変化

Fig. 10. Range of β and the frequency of ESLC mode wave with maximum reception efficiency corresponding to β .

$$\cos^2 \theta_{res} = \left(\frac{1+R}{R} \right) Z - (1-Z)D - Z^2/R \tag{6}$$

ただし, $R \equiv F_P^2/F_H^2$, $Z \equiv F^2/F_H^2$, $D \equiv m_e/m_i$ すなわち, 図11に示す通り 1つの θ に対して周波数は k の大きさに依存せず一意に定まる. したがって, $\beta = \theta_{res}(\rightarrow F)$ の条件から ESLC モード波に対して最も受信効率の良い周波数が図10の右端のスケールのように決まる. すな

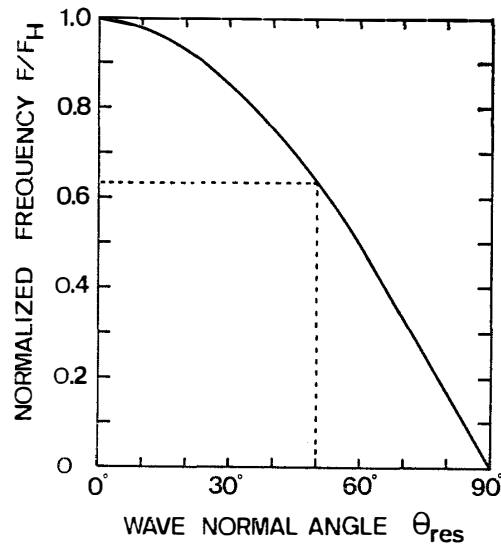


図11 ESLC モード波の伝搬方向と周波数との関係

Fig. 11. Relationship between the wave normal angle and the frequency of ESLC mode wave.

わち、Type III エミッションの観測された時刻においてはその周波数帯域がほぼ $0 \leq F/F_H \leq 0.2$ となり、他の時刻に比べて特に低周波側で受信効率が良くなっている。

以上のように、Type III エミッションの出現は、アンテナ受信方向の変化とそれに対する周波数依存性という立場から十分に観測事実を説明することができる。

5. 結 論

S-210JA-21 号機に搭載された PWH により、100 kHz から 10 MHz に渡る高周波領域におけるプラズマ波動のスペクトル観測を行った結果、3種類の明瞭なエミッションが観測された。これらを同時に観測した電子密度および降下粒子フラックスと比較解析を行った結果、これらのエミッションは極域電離層に降り込む降下粒子により $F_P < F < F_{UHR}$ (Type I)、および $F < F_H$ (Type II, III) の各周波数帯において励起された静電的プラズマ波動であることが判明した。さらに、このうち Type I エミッションは、かなりの部分電磁波モードまでモード変換を起こしていることが明らかとなった。

以上、本ロケット観測によって高度 100 km 前後という波動粒子相互作用の立場からは、かなり低い電離層レベルにおいても実際に降下粒子による波動励起が行われていることが実証された。今回の観測成果を踏まえて、今後、より明確な観測意図に基づいた観測計画を推進する必要がある。

謝 辞

本ロケット観測の機会を与えて下さった国立極地研究所, ならびに厳しい環境の中で実際にロケット打ち上げおよび地上観測の労をとられた第17次南極地域観測隊 (芳野起夫隊長) の方々に厚く感謝の意を表します。また同時に搭載された NEL および ESH の各データは, それぞれ電波研究所宮崎茂氏, 理化学研究所小玉正弘氏にいただいた。あわせて謝意を表します。

文 献

- GURNETT, D. A. (1974): The earth as a radio source: Terrestrial kilometric radiation. *J. Geophys. Res.*, **79**, 4227-4238.
- GURNETT, D. A. and FRANK, L. A. (1977): A region of intense plasma wave turbulence on auroral field lines. *J. Geophys. Res.*, **82**, 1031-1050.
- KARPMAN, V. I., ALEKHIN, Ju. K., BORISOV, N. D. and RJABOVA, N. A. (1975): Electrostatic electron-cyclotron waves in plasma with a loss-cone distribution. *Plasma Phys.*, **17**, 361-372.
- MORIOKA, A., OYA, H., MIYATAKE, S. and ONO, T. (1979): Earth kilometric radiation observed by JIKIKEN. *Magnetospheric Study 1979, Japanese IMS Committee*, 224-228.
- OYA, H. (1971): Conversion of electrostatic plasma waves into electromagnetic waves: numerical calculation of the dispersion relation for all wavelengths. *Radio Sci.*, **6**, 1131-1141.
- OYA, H. (1974): Origin of Jovian decameter wave emissions—Conversion from the electron cyclotron plasma wave to the ordinary mode electromagnetic wave. *Planet. Space Sci.*, **22**, 687-708.
- OYA, H. (1979): Summary on plasma wave emissions observed by JIKIKEN. *Magnetospheric Study 1979, Japanese IMS Committee*, 200-213.
- STIX, T. H. (1962): *The Theory of Plasma Waves*. New York, McGraw-Hill, 158p.
- YOUNG, T. S. T. (1974): Electrostatic waves at half electron gyrofrequency. *J. Geophys. Res.*, **79**, 1985-1988.

(1979年7月5日受理)