

# 電離圏・磁気圏における波動粒子相互作用

大 家 寛\*

## Wave-Particle Interaction in the Ionosphere and Magnetosphere

Hiroshi OYA\*

**Abstract:** Wave-particle interactions that are important processes for the control of the electromagnetic states in the earth's magnetosphere are surveyed relating to the auroral zone that is the most suitable window to clarify the various aspects of wave-particle interactions.

The wave-particle interactions are classified using two-dimensional keys; the first is the plasma parameter and the second is the frequency normalized by the electron cyclotron frequency. The plasma parameter is directly related to the place, such as ionosphere, plasmasphere, plasmopause and magnetosphere. The frequency normalized by the electron cyclotron frequency at a given region becomes a useful tool for analyses of the fundamental process of the wave generation both for the beam-wave instability or the other instability due to non Maxwellian type velocity distribution of the particles. Three channels are important for the generation of the plasma waves such as 1) between the plasma frequency and the upper hybrid resonance frequency, 2) between half electron cyclotron frequency and exact electron cyclotron frequency, and 3) near the lower hybrid resonance frequency. These channels largely contribute to the generation of the plasma waves and also wave-particle interactions relating to the electrostatic mode that produces strong interaction even with the low energy particles that occupy the majority of the population in the earth's magnetosphere. This evidence gives a revolutionary change to the old concept of wave particle interaction that has been concentrated only to the wave-particle interaction between the electromagnetic waves and the high energetic particles with energy larger than several tens keV.

**要旨** 電離圏および磁気圏において複雑に展開している波動粒子相互作用は、静電的プラズマ波動から電磁波動に至る広大なプラズマ波動の全域にわたる  $\omega$ - $k$  図の中に、それぞれの波動粒子相互作用を位置づけることによって整理することができる。

この整理は、まず  $\omega/\Omega_e$  ( $\Omega_e$  は電子サイクロトロン角周波数) と  $\Omega_e$  および  $\pi_e$  ( $\pi_e$  はプラズマ角周波数) といった二つの鍵をもって行われるが、電離層、プラズマ圏、および磁気圏にわたって、三つの重要な波動粒子相互作用のチャンネルが存在する。すなわち、

$$1) \pi_e < \omega < \sqrt{\pi_e^2 + \Omega_e^2}$$

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

- 2)  $\Omega_e/2 < \omega < \Omega_e$  および  
 3)  $\omega \approx \Omega_{LHR}$  ( $\Omega_{LHR}$  は低域ハイフリット周波数)

である。こうした三つのチャンネルを通して言える重要な事柄は、磁気圏に豊富に存在している、比較的低エネルギーの粒子成分が静電的プラズマ波動を生成することが、プラズマ波動生成の本質を作っていることである。これは、宇宙空間のプラズマ波動が 100 keV 以上の範囲の高エネルギー粒子によって直接生成されるとする従来の考え方を本質的に変えてゆく。

## 1. 序

極域は波動粒子相互作用の激動域である。磁力線に平行方向に印加されてくる磁気圏の電圧は、ここに、粒子加速を呼び、加速された粒子は、何らかの形で波動を励起する。この領域は、極域のプラズマ過程が惹起する種々の現象を明らかにするとともに、自然が織りなす波動粒子相互作用を解明する格好の領域となる。

ここでは、極域で観測される諸現象を物理的過程をベースとして整理してみた。今後の研究の展開や観測事実の理論体系化等に有用なカイトラインとなれば幸いである。

## 2. 極域の波動現象の分類

### 2.1. 分類

極域の波動現象は、その発生場所を地球からの距離で分類することができる。すなわち、100–1000 km の電離層域、1000 km– $3R_E$  のプラズマ圏、さらに  $3R_E$ – $10R_E$  に至る極域に直結する磁気圏域である。

表 1 波動現象  
 Table 1 Wave phenomena

Frequency Space	ULF	ELF	VLF	MF	HF
Ionosphere			Hiss	ESCH	ESCH
Plasmasphere 1.2 – 3.0		Hiss	Hiss	AKR (TKR)	
Plasma pause 3.0 – 5 (Variable)	Pulsation Pc 1	Chorus	Emissions		
Plasma sheet	P1.2	Chorus			
Magnetotail and Frank	Pulsations Pc 3 – Pc 5				

また、波動現象を性格づけるもう一つの手がかりは、言うまでもなく周波数である。広く、ULF から HF 帯に至る周波数領域の現象が、地上のステーションから観測衛星に至るまでの広い手段によって取得されている。

表 1 に、周波数領域を横軸とし、縦軸に空間的分布をとって、極域に関連して観測されている波動現象を分類した。以下、各節にわたり、この表中に現れた波動現象のうち、最近特に観測の進んでいるものについて検討してゆくことにする。

## 2.2 波動粒子相互作用

### 2.2.1 ビーム型不安定

空間のそれぞれの領域で、その周波数は異なっても物理的にほぼ共通した性格をもつ波動群を生んでいるが、これは、電子サイクロトロン周波数、 $\Omega_e$  および電子サイクロトロン半径  $R$  で正規化した  $\omega$ - $k$  ダイアグラム上で表現すると、その全ぼうをつかむことができる。すなわち、図 1 は、一つの代表例として、 $\pi_e/\Omega_e=2$  ( $\pi_e$  はプラズマ角周波数) の場合について示したものである。この  $\omega$ - $k$  ダイアグラムでは、通常の CMA ダイアグラムと異なり、波動粒子相互作用の発生する領域を明確に示している点が特徴である。すなわち、図中には、速度  $V$  で入射してくる粒子群に対して、波動とエネルギー授受が可能になるような Cerenkov の共鳴条件、

$$V = \omega/k \quad (1)$$

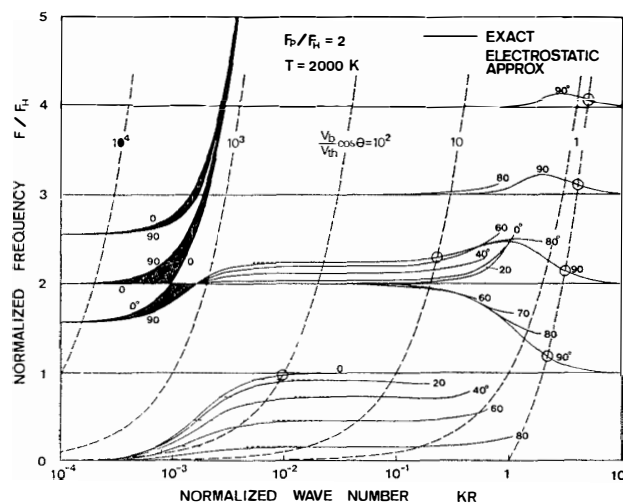


図 1 プラズマ波動の  $\omega$ - $k$  図、ビームの速度  $V$  とそれに対応するラントー型相互作用条件が併記されている

Fig 1. A  $\omega$ - $k$  diagram of the plasma wave, the Landau type interaction can be found at each cross point corresponding to curves for given velocities

を満たす領域が描かれている。言い換えると、

$$y = (V/V_{th})x \quad (2)$$

の線と、分散曲線

$$y = k(x) \quad (3)$$

の交点が、Cerenkovの共鳴条件を与えることになる。ただし、 $y = \omega/\Omega_e$ であり、 $x = kR$ と  
おいている。この図から帰結することは、プラズマ中で励起される波動は、やはり、その原  
因となる粒子を高エネルギー、中エネルギーおよび低エネルギーの三種に分類すると整然と  
把握されることである。高エネルギー粒子は、この場合、相対論的電子であって、直接電磁  
波動を励起する。1 MeV以上の粒子を考えるとすると、HF帯とVLF帯のホインスラーモ  
ード波がありうる。しかし、最も豊富に磁気圏に存在し、また極域で波動現象を惹起するの  
は、1 keV-10 keVに至る中程度のエネルギー領域である。これには、図1に示す $\omega$ - $k$ タイア  
グラム上では、二つの顕著なチャンネルがある。ひとつは、

$$\pi_e < \omega < \sqrt{\pi_e^2 + \Omega_e^2},$$

つまり、プラズマ周波数と高域ハイフリットの間にあるもので、もう一つのチャンネルは

$$\omega_{LHR} < \omega < \Omega_e.$$

つまり、低域ハイフリット周波数以上にあり、電子サイクロトロン周波数にわたってのひて  
いるものである

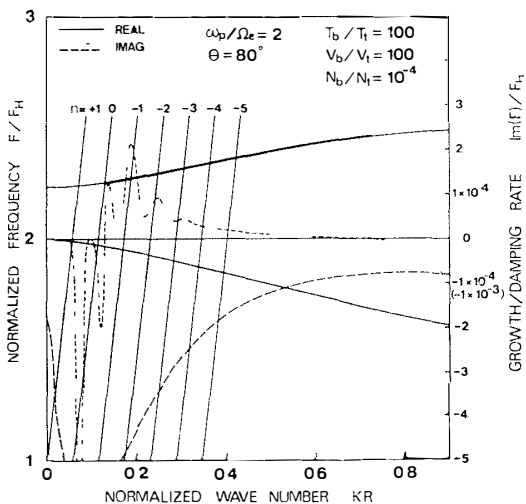


図2  $\omega_p/\Omega_e=2$  の場合の  $\omega$ - $k$  図、ヒームが存在する  
場合の波動の成長率を点線で示す

Fig 2 A  $\omega$ - $k$  diagram for  $\omega_p/\Omega_e=2$ , the growth  
rate of the plasma waves, for the beam  
velocity  $V_B=100 V_{th}$ , is given by dotted  
lines

第三の領域は、低エネルギー粒子によっ  
てもたらされるものである。これは性格上、  
静電的プラズマ波動を励起する。よく知ら  
れている電子サイクロトロン共鳴波がこれ  
に属するが、また電子サイクロトロン周波  
数以下の領域でもこの波動が発生するとい  
う点に特徴がある。このモードは、一見電  
磁波とは直結していないように見えるが、  
後に述べるように、エネルギーのリニア変  
換の結果、電磁波の発生の重要な origin と  
なるものである

波動粒子相互作用は、電子ヒームに対し  
て、さらにサイクロトロン型の作用として



生ずる。すなわち、

$$\omega - kV = n\Omega_e$$

の条件を満たす共鳴現象で、ビームのエネルギーが波動に変換されてゆくことになる。図1に求めたランドー型の波動粒子相互作用点と、ここで述べたサイクロトロン型の共鳴点とについて、一般にビーム不安定の場合の波動の成長を著者等の研究グループで理論的に取り扱っている。その一例が、図2に示されている。この結果は、実線がビームの存在する場合の波動の分散関係で、点線がその虚数部、すなわち波動の成長を、あるいは減衰を表す。この場合、ビームの密度は背景プラズマ密度の  $10^{-6}$  となるが、Cerenkov 条件やサイクロトロン条件を満たす点で、明らかに波動が成長することを示している。

2.2 2. 非等方性速度分布型不安定

ヒーム型不安定は、ある意味では、粒子の速度分布が磁力線に平行方向に卓越するケースであるが、これと対応する極端なケースは、粒子の速度分布が磁力線に対して直角方向に卓越するものがある。すなわち、Harris 型 (HARRIS, 1959; SHIMA and HALL, 1965; OYA, 1971) 分布に基づく不安定や Loss cone 分布型 (KARPMAN *et al.*, 1973) 不安定は、よく知られたものである。いずれの場合も完全な平衡分布、すなわち磁力線の平行方向と直角方向の分布が均質になるように、プラズマのエネルギー調整をする段階でそのエネルギーがプラズマ波動として放出されるもので、極域に関連するプラズマの各々の領域で、静電的プラズマ波動を生む重要な要因となっている。

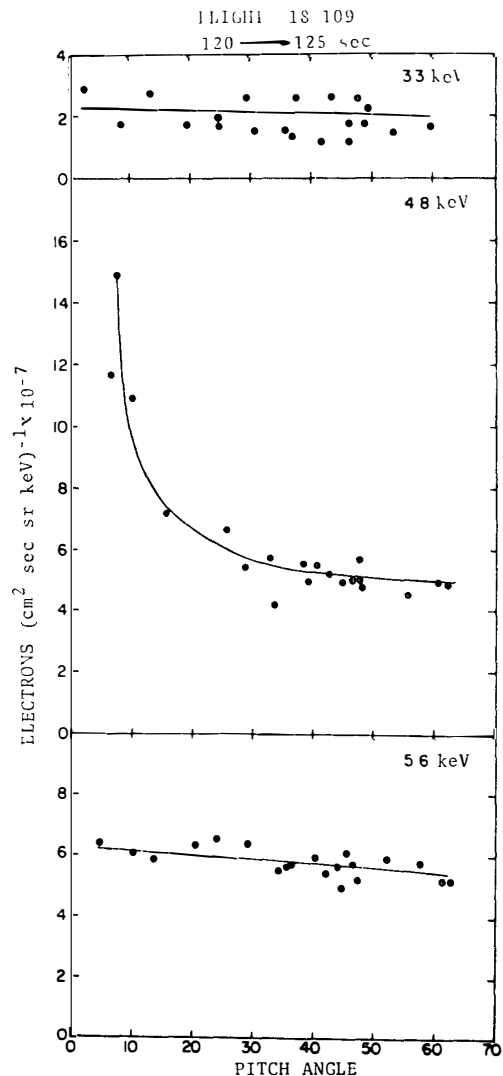


図3 ARNOLDY 等の観測したオーロラ粒子のピッチアングル分布の例(ARNOLDY, 1974)

Fig. 3. An example of the pitch angle distribution of the auroral particles observed by Skylark rocket (after ARNOLDY, 1974).

### 3. 粒子速度分布計測の進歩

粒子の速度分布の観測の進歩は、極域プラズマの波動粒子相互作用の研究を一層推進してゆくものであるが、その中では、まず、ARNOLDY (1974) のロケット観測がとりあげられる。図3に、その代表的成果の一部を示すが、まず 4.8 keV 付近ではピッチ角が  $0^\circ$  近くの方が急激に卓越するという現象を示し、これは明らかに、極域電離層に降下してくる粒子群が、ビーム型であることを示したものである。図4は、別の event をとらえているが、ここでは今度は電子のエネルギースペクトルを示しており、きわまってシャープなピークをもつ速度分布関数となっている。

粒子降下をさらに詳細に検討したものは、BURCH *et al* (1976) で、AE (Atmospheric Explorer) C によって、降下粒子の性格を明らかにしている。特に強調されているのは、粒子降下が局所的な電場によって加速されている点である。

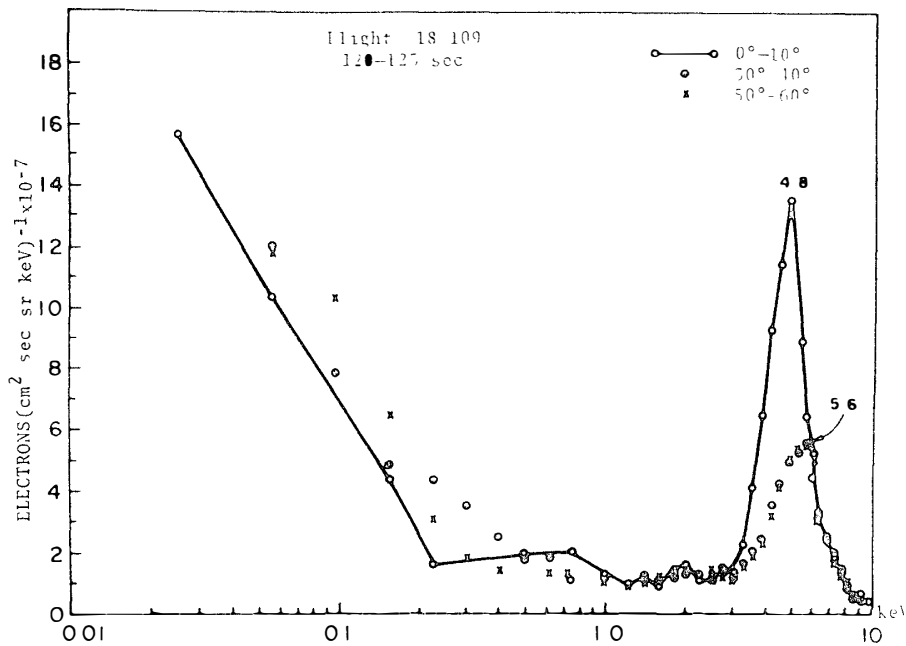


図4 オーロラ粒子のエネルギースペクトル (ARNOLDY, 1974)

Fig 4 An example of the pitch angle sorted spectra of the auroral particles observed by Skylark rocket (after ARNOLDY, 1974)

#### 3.1. 波動粒子相互作用の確認

FOSTER and ROSENBERG (1976) は、電子降下がプラズマボース付近に生ずる VLF 放射と明確に対応していることを実証した。これは、100 keV-300 keV のエネルギーをもってサイクロトロン運動している粒子群と、VLF 電波の相互作用過程の結果として粒子降下を起こし、そ

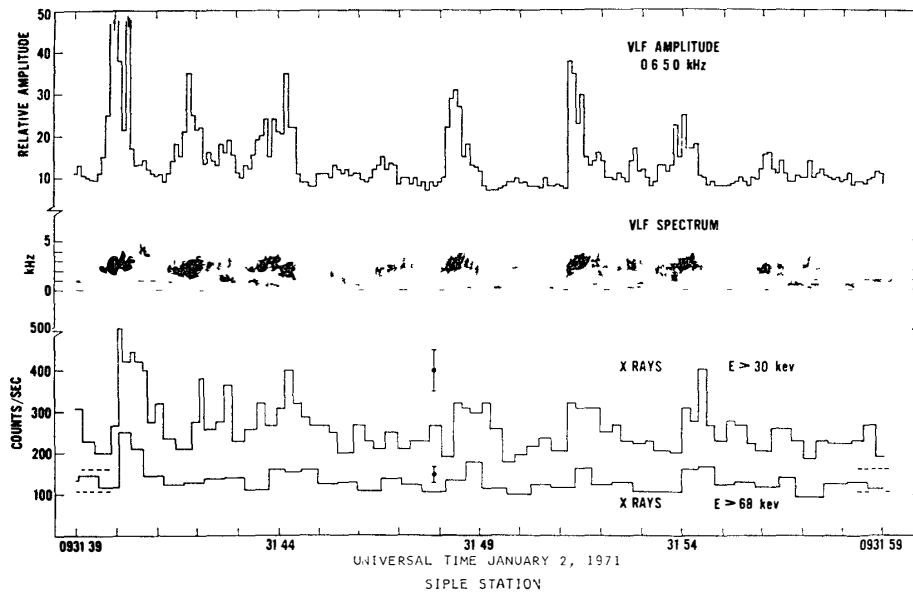


図 5 VLF 電波放射と、粒子降下の相関性を実証するデータ (FOSTER and ROSENBERG, 1976)

Fig 5 Correlated bursts of VLF rising tones and X-rays, it is noted that the VLF bursts precede the X-ray bursts by approximately 0.2 s (after FOSTER and ROSENBERG, 1976)

れが電離層で X 線を放射していることを明らかにしたものである。こうした問題に対しては、古くから理論が提出されていたが、resonance 条件から波動粒子相互作用の結果、粒子が下降現象を起こすことを実証的に示したものである。図 5 は、その結果の一部であるが、非常に興味深いものである。

#### 4. 磁力線平行方向の電場

古典的な磁気圏の理論は、磁力線に平行方向には電氣的に直結していることをその理論的根拠としている。つまり、まったく抵抗のない等電位線として表現しているが、このことには、古くから ALFVÉN が大きな疑問を持っていた。彼の理論は、FALTHAMER に引きつがれているが、磁場が有限の構造、すなわち不均一性を伴う時、プラズマには微細な不平衡、つまりイオンと電子の数の不一致が生じ、ここから電場が生ずると考えるものである。その結果、磁力線と平行方向に電界が発生するというものである。このスウェーデン学派の主張は、ついに最近実証され始めた。

すでに述べたように、BURCH *et al.* (1976) の粒子の観測結果は、電子が磁力線方向に加速されることを示しているが、さらにそれに先んじて、BOSQUED *et al.* (1974) は、スカイラークロケットを使った実験の結果、オーロラの電子が同じように電離層近傍で、磁力線に平行方

向に加速された結果であることを見出していた。このことは、後に離散性オーロラアークの形成に関しても局所的な加速を必要とするという見解を導いてきた (KAN and AKASOFU, 1976)

磁力線に平行方向に存在する電場については、もっと具体的には三つの理論がある。その第1として異常抵抗の理論があるが、これは、粒子降下によって波動を生じ、波動粒子相互作用のプロセスは、等価的に電気伝導度 $\sigma$ を低下させる。その結果、 $E_{\parallel} = I/\sigma$ の形で電場が発生するとするものである。第2は、ダブル層理論 (BLOCK, 1972) で、これは不均一プラズマ分布が磁力線に沿って一様に分布するのではなく、一箇所に集中してくるため double layer を作り、局所的に高い電位差を生ずると考えるものである。第3は、粒子が急激に降下する時、磁力線に沿って衝撃波が形成されると考えるもので、衝撃波理論 (KAN, 1975) と呼ぶるものである。

以上、三つのメカニズムのうち、どれが正しいか、今後解明されてゆくことになるが、ロケットや観測衛星で、磁場に平行方向の電場を厳密に計測すると同時に、この領域で発生するプラズマ不安定の状況を正確につかむ必要がある。このプラズマ不安定は、電場の空間分布の様相を明らかにすることになる。このプラズマ不安定は、そこから放射されてくるプラズマ波、あるいは電磁波を詳細に観測することによって明らかにされるであろう。極域におけるプラズマ波動の観測は、こうした観点に立っても、非常に重要なことがらである。

## 5. オーロラ粒子との相互作用

すでに見てきたように、エネルギーの低い成分も、波数の大きな波動群と相互作用する。この点が明確になり始めたことが、1975年以降の宇宙空間の波動研究の分野での大きな成果の一つである。

### 5.1. 電離層レベルでの相互作用

電離層レベルでの波動と粒子の相互作用の研究は、比較的最近に行われるようになった。わが国の S-310 ロケットは、この点で大きな貢献をしつつある。まず、S-310 JA-1 号機および 2 号機で観測された結果は、電子の静電的サイクロトロン波の一族の存在を明らかに示した。図 6 にその代表例を示す。この場合は、降下する粒子は数 keV の領域に卓越していて、明かに電磁波を直接生むといった領域の現象ではない。しかし、この波動は二つのチャンネルを通じて電磁波に変わる。その一つのチャンネルは、UHR (高域ハイブリッド周波数) にあるし、他の一つのチャンネルは、電子サイクロトロン周波数以下で静電的サイクロトロン波動の領域につながるものである。したがって、こうした低エネルギーの粒子群で発生した波動は、

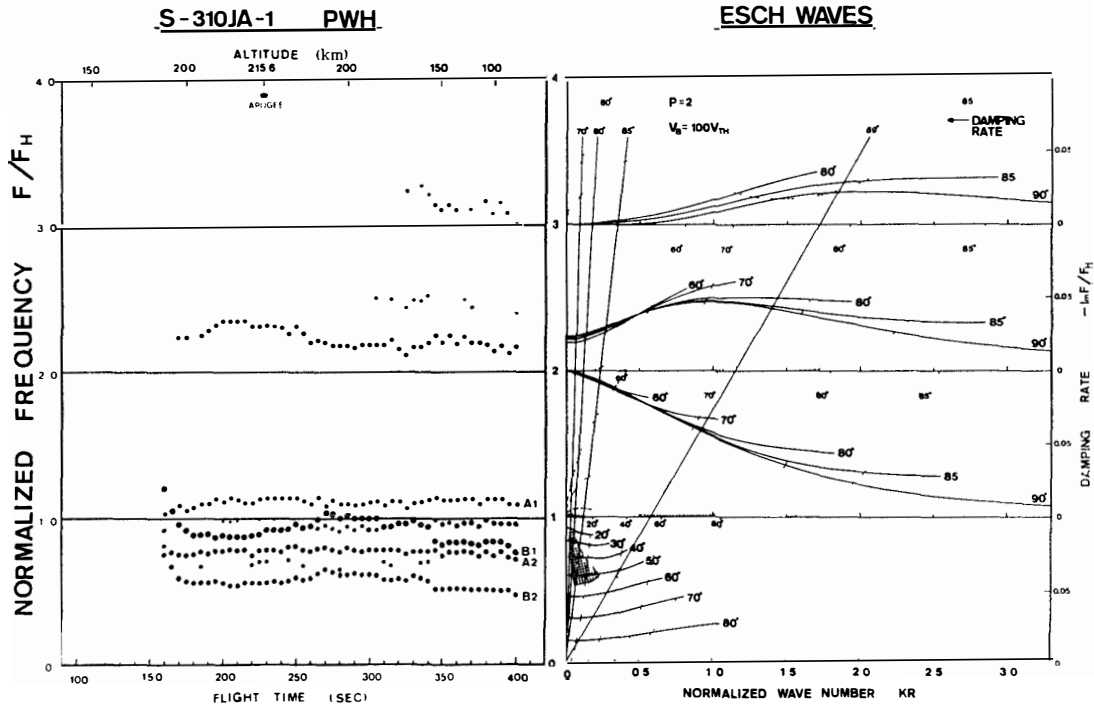


図 6 南極ロケット S-310 JA-1 号機により観測された極域電離層中の HF 波動エミッションに関するスペクトル 計算された、 $\omega-k$  図と対比されていて  $\omega/k=V$  の点で波動が生ずる

Fig 6. The plasma wave emissions in the HF (high frequency) range observed by S-310JA-1 rocket in the polar ionosphere.

単に局所領域を占めるのではなく、電磁波動に変換され遠方に伝搬してゆく。こうした点は、この電離層領域に限らず重要な点で、従来支配的であった電磁波の直接発生という概念を大きく変えてゆくものである。

### 5.2. Terrestrial kilometric radiation

この現象は、地表面では見出せなかった。つまり、電離層の最大臨界周波数  $f_oF_2$  よりも低い周波数領域で、衛星によって観測されたもので、1974年、GURNETT (1974) により報告されたが、その後 KAISER and ALEXANDER (1976) の月軌道の観測もある。図7にそのスペクトルを示すが、地球は、木星と同じような電波を宇宙に向かって放射していたのである。

この原因を解明すべく、多くの理論が提出され始めた。その一つは、BENSON (1975) によるがその場合は、主として木星デカメータ波帯電波の発射機構を説明した OYA (1974) モデルを地球の場合に適用しようとしたものである。その conversion のプロセスにはまちがいが無いとしても、はたしていかなる instability から TKR が発生するかについては、問題が残されている。つまり木星の電離層で発生するデカメータ波に対して、TKR は地球のプラズ

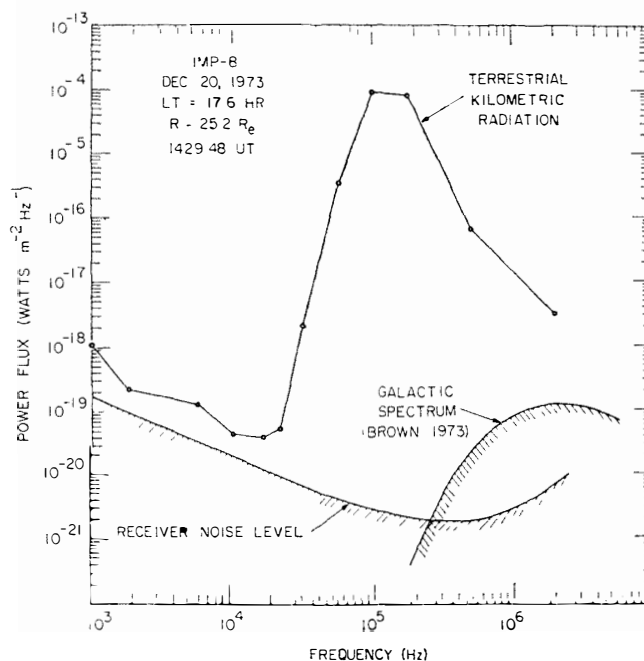


図 7 オーロラ・キロメトリック放射のスペクトル (GURNETT, 1974)

Fig 7 The spectrum of the auroral kilometric radio waves (after GURNETT, 1974)

マ圏で発生する。つまり木星においても、デカメータ波よりはヘクトメータ波に対応したものであることを考えると、OYA モデルをそのままこの TKR に使ってよいか否かは今後の検討事項であろう。

すでに明らかにされているように、TKR はオーロラ粒子の降下あるいは流入と完全に対応したものである。オーロラ粒子は 10 keV 以下の領域でそのエネルギーが卓越するものであり、決して電磁波が直接発射される性格のものでない。このことは、プラズマ波動が電磁波へ線型的に conversion することが主要な働きをしているものとして重要な点である。つまり、かならず、UHR とプラズマ周波数の間のブランチを経て電磁波に変換されていることになる。

### 5.3. プラズマシート内の ESCH 波

ESCH (Electrostatic electron cyclotron harmonic waves) 波動は、電離層レベルでは、500 kHz-2 MHz、プラズマ圏では、100 kHz-300 kHz にわたって卓越するが、さらにプラズマシート内に入ると、5 kHz-20 kHz の領域に周波数が低下してくる。すでに KENNEL *et al.* (1970) によって報告された VLF 波動は、 $(3/2)f_e$  ( $f_e$  は電子サイクロトロン周波数) においてきわめて pure tone の電界を観測した。図 8 にその典型的な例を示す。この電界は、静電的プラズマ波によるものであり、FREDRICKS (1971)、OYA (1972) の静電的電子サイクロトロン波

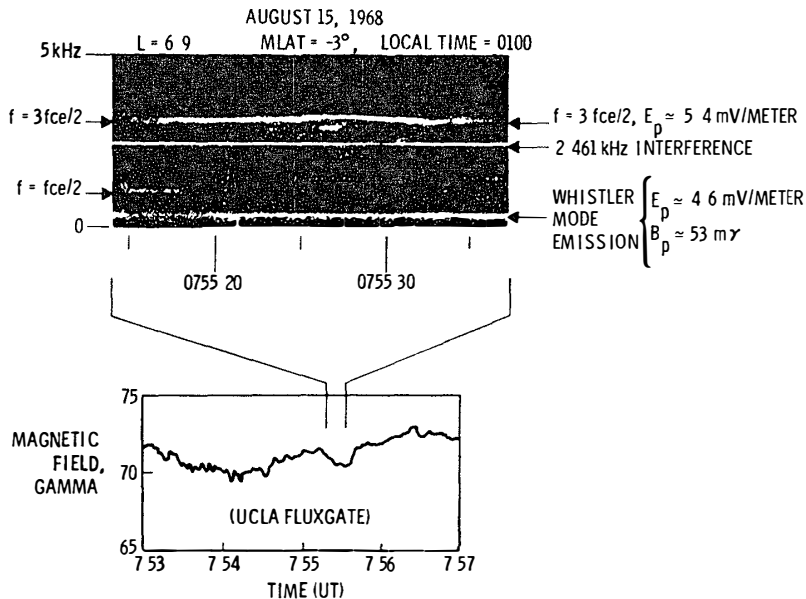


図 8 プラズマポーズの外側で観測された静電的プラズマ波動のスペクトル。  $3/2 f_c$  付近で純粋なトーンをもっている (KENNEL *et al*, 1970)

Fig 8. Spectrum of the electrostatic electron cyclotron harmonic waves near  $3/2 f_c$  observed by OGO-5 satellite in the region outside of the plasmopause(after KENNEL *et al*, 1970)

の不安定現象の理論が提出されたが、さらにそれを modify したものが YOUNG *et al* (1973) の理論である。彼は、プラズマポーズ近傍におけるプラズマの性格を規定する特徴をつかんで、冷たいプラズマと熱いプラズマの混合状態に対して、発生するプラズマ不安定現象を解明し、やはり  $(3/2)f_c$  で発生する不安定状態を詳細に検討している。

## 6. プラズマポーズの波動粒子相互作用

前節では、すてに一部、プラズマポーズを越えた領域の現象が登場したが、まず、極域におけるプラズマ波動現象を拡張した方向で必然的に到達する領域がプラズマポーズである。

プラズマポーズでは、VLF 領域のプラズマポーズヒスとイオンサイクロロン波動が原因となる Pc 1 pulsation が登場する。

### 6.1. プラズマポーズヒス

プラズマポーズ付近で環電流が発生することはよく知られた現象の一つであるが、この環電流は、主として数 10 keV から数 100 keV に達する高エネルギー粒子が電流成分としては参与している。この数 100 keV の範囲の電子は、直接 VLF 領域で電磁波を生む。プラズマポー

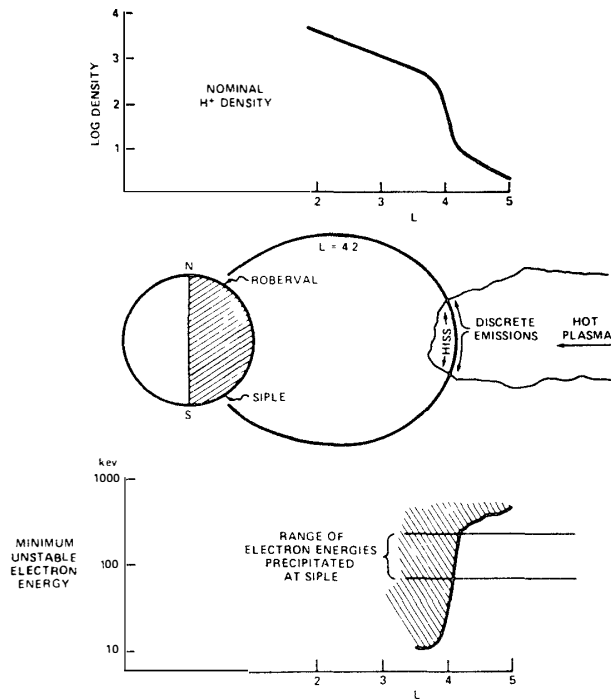


図 9 磁気圏尾から侵入するプラズマと、プラズマポーズにおける VLF ヒスの発生と消滅に関連する様相図 (FOSTER and ROSENBERG, 1976)

Fig. 9 A schematic representation of the inward diffusion of the plasma particles and the plasmopause hiss generation (after FOSTER and ROSENBERG, 1976)

スヒスとして知られているものである。ROSENBERG *et al* (1971) により粒子降下を電離層からの X 線増加としてとらえる時、VLF ヒスと X 線の増加とはよい対応をしていることがすでに検討されている。図 9 には、FOSTER and ROSENBERG (1976) がまとめたプラズマポーズと VLF ヒスの発生およびそこから粒子降下といった一連の状況を示す

## 6.2. Pc 1 現象

Pc 1 現象がプラズマポーズ付近に源をもち、地球と corotate する性格のあることはすでに古くから指摘されていた。それは、L-成分のポーラリゼーションをもって伝搬し、HM-ホイッスラーとして説明される (OBAYASHI, 1965) ような明確な伝搬様相をもったものや、時に単なる dispersion プロセスだけでは説明のつかないスペクトルの複合した現象 (KITAMURA and JACOBS, 1968) があるが、いずれにしても MHD 波の伝搬の様相が明確にされてきた。その原因としては、CORNWALL *et al* (1970) は、環電流を形成しているプロトンがプロトンサイクロトロン波を生む結果であることを指摘している。さらに、HEACOCK (1971) も Pc 1 のソースがプラズマ圏に向かって inward diffusion を起こしているプロトンによっていることを確認している。すでに、CORNWALL (1970) は、静電的イオンサイクロトロン波動のモードの可能性を指摘はしていたか、その後、UHR における理論 (OYA, 1971) を NAMBU (1973) は LHR 波に拡張した結果、静電的イオンサイクロトロン波動が電磁波モードに変換し、Pc 1 波動になりうることを提唱した。この領域は、プロトンの広いエネルギー領域にわたって Pc 1



の源となり得るという点で、今後も続いて究明してゆくことが重要である。

### 7. 磁気圏のプラズマ波動—コーラスの諸性質

ヒスとコーラスは、代表的な極域の ELF および VLF 現象であるが、VLF ヒスは、比較的電離層近傍で発生するのに対して、ELF コーラスは、かなり遠方から伝搬してくるもので、磁気圏の波動粒子相互作用に関する物理的様相をそのまま反映することになる。

従来、この波動粒子相互作用は、通常の VLF あるいは ELF 領域の電磁波動が (粒子との相互作用の過程で)、直接発射されるものと考えられてきた。しかし、実際の事情ははるかに異なったもので、むしろ、まず静電的プラズマ波動として、プラズマ状態を十分に反映する形で波動が形成され、それが電磁波動に変換することが、より実際的な状況であることが判明したのである。

まず、コーラスの姿を明確にしたのは、最近の TSURUTANI and SMITH (1977) の仕事で、図 10 に、ELF 領域のコーラスの発生場所を示している。通常の説明は、10 keV-100 keV の範囲の電子のフラックスが増大し、ここで ELF 電磁波を直接 generate するというふうになされていたが、10 keV-100 keV にわたる粒子群は、もっと radiation belt の内部に侵入した状態で多量に生まれることが予想され、むしろこうした領域は、10 keV 以下のオーロラ粒子群や、数 keV の sheath 内プラズマ群から発生している。つまり、 $f_c/2$  あるいは  $(3/2)f_c$  で発生

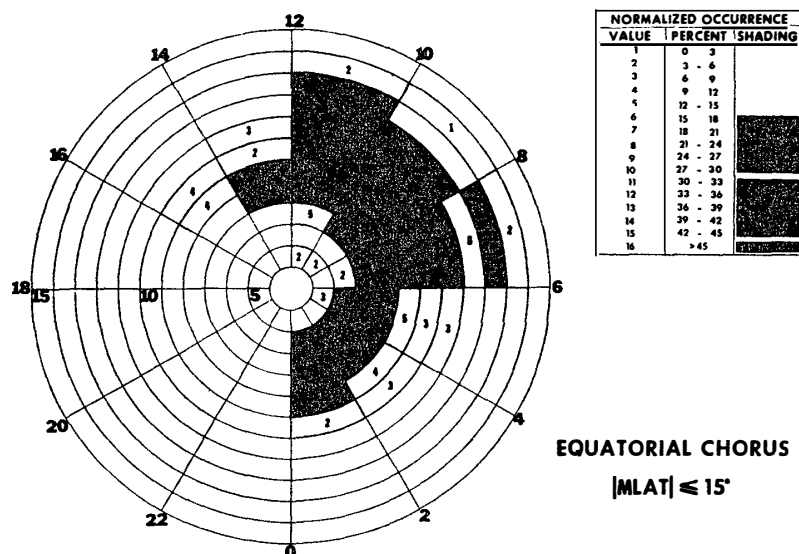


図 10 ELF コーラスの発生領域 (TSURUTANI and SMITH, 1977)

Fig. 10 The normalized L-L T distribution for equatorial chorus (after TSURUTANI and SMITH, 1977).

するような静電的プラズマ波動が、電磁波動に変換したものであることを強く示唆するものである。

これを裏づけるようなスペクトルが観測されている。TSURUTANI and SMITH (1974) は、post-midnight chorus を観測しているが、そのスペクトルは、図 11 に示すように非常に明瞭でフラットな様相を示している。この場合、500 Hz の部分にエミッションが発生しているが、この観測は、 $L=6\sim 7$  付近では行われていて、かなり長距離にわたって伝搬している様相を示す。

それが源では、 $f_c/2$  付近で成長する不安定に起因しているとするれば、ダイポール近似を使う時、 $9.6R_E$  で発生したことになる。Nightside tail では、これはほぼ  $8R_E$  となっている。こ

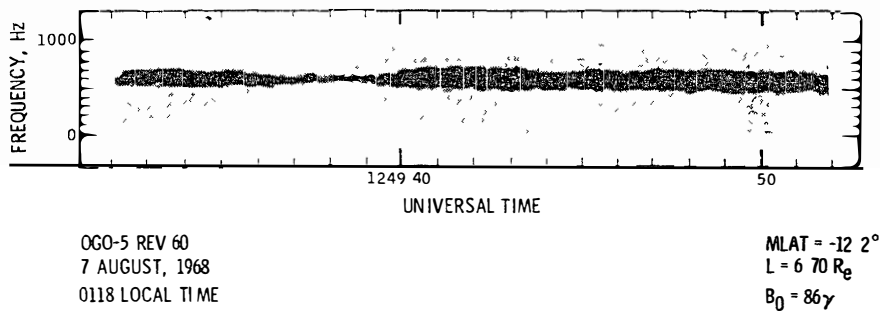


図 11 磁気圏尾部で観測された ELF コーラスのスペクトル，サーチコイルを用いて磁場成分として観測している (TSURUTANI and SMITH, 1974)

Fig. 11. Spectrum of the emissions observed by OGO-5 in the midnight sector (after TSURUTANI and SMITH, 1974)

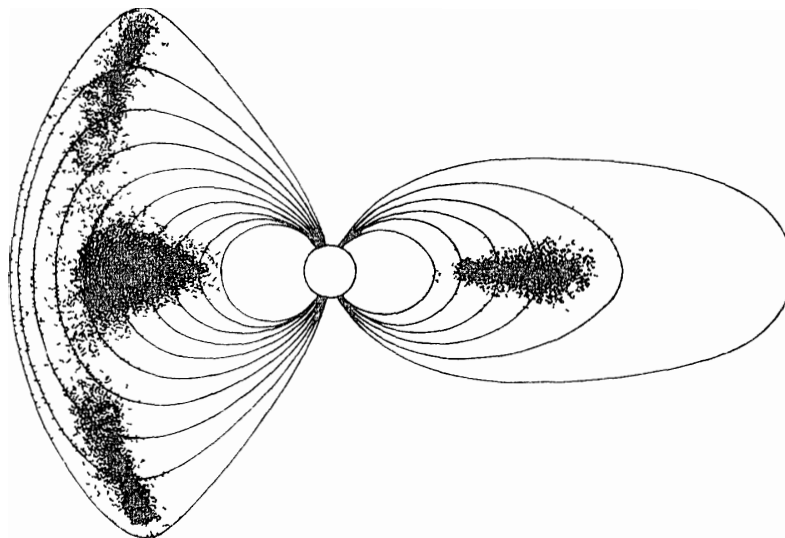


図 12 磁気圏の子午面断面に投影した ELF コーラスの発生領域 (TSURUTANI and SMITH, 1977)

Fig. 12 A representation of the regions in which chorus is generated (after TSURUTANI and SMITH, 1977)

ここに示された例以外にも、500 Hz-700 Hz にわたって現象は頻繁に観測されているが、これらを総合すると、図 12 で示す領域では、 $f_c/2$  付近の静電的プラズマ波動として波動現象が発生していることを明確に示している。

## 8. 結 び

極域電離層からはじまり、磁気圏に至るプラズマ領域での波動粒子相互作用は複雑で多岐にわたるが、この中で、顕著なエネルギー授受が可能な現象は、波動と粒子が共鳴状態を生じた時である。この波動粒子相互作用には、ランドー型 ( $\omega - kV = 0$ ) とサイクロトロン型 ( $\omega - kV = n\Omega_e$ ) がある。さらに、本論では、一部であれたが、磁力線に直角方向の速度分布が卓越するという形で、Maxwell 分布からずれた場合の波動の生成と成長のプロセスがある。これは、前者のビーム型不安定とは本質的に異なるカテゴリーに属す。

ビーム型不安定は、 $\omega-k$  図上で、その発生点を一望のもとに把握することができる。ところで、この  $\omega-k$  図は、周波数（したがって波数に対応する）と同時にプラズマの諸パラメータとも対応しているもので、波動現象を周波数と宇宙空間の領域の二つの要因を鍵に解明し整理してゆくことが可能となる。一回のサブストームにおいてすら、波動粒子相互作用は、磁気圏からプラズマポーズ、そして極域電離層へとわたる一本の磁力線につながる広い領域にわたってプラズマ波動を起こすが、それぞれの発生場所においては、流入する粒子のエネルギーに応じた波動粒子相互作用が行われている。その中でも、広いエネルギー範囲にわたって相互作用が展開するのは、1) プラズマ周波数から UHR 周波数にわたる領域、2) 電子サイクロトロン周波数以下の領域 ( $\Omega_e/2$  あるいは、LHR まで) および 3) LHR 近傍の周波数である。

プラズマ波動は、電磁波の形で観測されている。したがって、従来、電磁波が直接発生するというメカニズムのみが考えられていたが、比較的低エネルギーの成分が波長の短い、すなわち、静電的プラズマ波動を生み、それが電磁波に変換していることが判明してきた。プラズマ波動は、したがって、それぞれの空間のプラズマの情報を詳細に伝えるとともに、プラズマの中で生起している諸現象を制御する重要な要素となっている。

こうした波動粒子相互作用の諸相を明らかにする観測は、現在、急速に進んでいるが、その全ぼうが明らかになるのも遠い先のことではないであろう。また、プラズマ波動の諸相を明らかにすることがひとまず完了した時、波動粒子相互作用が、磁気圏の電磁現象を制御してゆく様相の解明に着手されてゆくことになるろう。

## 文 獻

- ARNOLDY, R L (1974) Field-aligned auroral electron fluxes. *J. Geophys. Res* , **79**, 4208–4221.
- BENSON, R. F (1975) Source mechanism for terrestrial kilometric radiation. *Geophys. Res Lett.*, **2**, 52–55.
- BLOCK, L P. (1972) Potential double layers in the ionosphere. *Cosmic Electrodyn.*, **3**, 349–376.
- BOSQUED, J M , CARDONA, G and RÉME, H. (1974) Auroral electron fluxes parallel to the geomagnetic field lines. *J Geophys Res* , **79**, 98–104
- BURCH, J L , FIELDS, S A , HANSON, W. B. and JANETZBE, R W (1976). Characteristics of auroral electron acceleration regions observed by Atmosphere Explorer C *J Geophys Res* , **81**, 2223–2230
- CORNWALL, J M , CORONITI, F V. and THORNE, R M (1970) Turbulent loss of ring current protons. *J Geophys Res* , **75**, 4699–4709
- CRISWELL, D. R. (1969) Pc1 micropulsation activity and magnetospheric amplification of 0.2 to 5.0 Hz hydromagnetic waves *J Geophys Res* , **74**, 205–224
- 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
- FOSTER, J. C , ROSENBERG, T. J. and LANZEROTTI, L. J. (1976) Magnetospheric conditions at the time of enhanced waveparticle interactions near the plasmapause *J. Geophys Res* , **81**, 2175–2182
- FREDRICKS, R W. (1971) Plasma instability at  $(n+1/2)f_c$  and its relationship to some satellite observations *J Geophys Res* , **76**, 5344–5348
- GURNETT, D A (1974) The earth as a radio source Terrestrial kilometric radiation *J Geophys Res* , **79**, 4227–4238.
- HARRIS, E G (1965). Unstable plasma oscillations in a magnetic field *Phys Rev Lett* , **2**, 34–36
- HEACOCK, R R (1971). The relation of the Pc-1 micropulsation source region to the plasmasphere *J Geophys Res* , **76**, 100–109
- KAISER, M L. and ALEXANDER, J. K. (1976) Source location measurements of terrestrial kilometric radiation obtained from lunar orbit *Geophys Res Lett* , **3**, 37–40
- KAN, J R (1975). Energization of auroral electrons by electrostatic shock waves *J Geophys. Res.*, **80**, 2089–2095
- KAN, J. R and AKASOFU, S. -I (1976) Energy source and mechanisms for accelerating the electrons and driving the field-aligned currents of the discrete auroral arc *J Geophys Res* , **81**, 5123–5129
- KARPMAN, V. I , ALEKHIN, Ju. K , BORISOV, N D. and RJABOVA, N. A (1973) Electrostatic waves with frequencies above the gyrofrequency in a plasma with a loss-cone *Phys Lett. A*, **44**, 205
- KENNEL, C. F., SCARF, F. L , FREDRICKS, R. W., MCGEHEE, J. H. and CORONITI, F. V. (1970) VLF electric-field observations in the magnetosphere. *J. Geophys. Res* , **75**, 6136–6152.
- KITAMURA, T. and JACOBS, J A (1968). Ray paths of PCL waves in the magnetosphere *Planet Space Sci* , **16**, 863–879
- NAMBU, M (1973). High- $\beta$  effect on the generalized ion Bernstein mode near the lower hybrid frequency *J Plasma Phys* , **7**, 503–512.
- OBAYASHI, T. (1965). Hydromagnetic whistlers *J Geophys Res* , **70**, 1069–1078
- 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. (1972) Turbulence of electrostatic electron cyclotron harmonic waves observed by OGO-5 *J Geophys. Res* , **77**, 3483–3494.
- 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.
- ROSSENBERG, T. J., HELLIWELL, R. A. and KATSUFRAKIS, J. P. (1971): Electron precipitation associated with discrete very-low-frequency emissions. *J. Geophys. Res* , **76**, 8445–8452.
- SHIMA, Y. and HALL, L. S. (1965): Electrostatic instabilities in a plasma with anisotropic velocity distribution. *Phys Rev* , **139**, A1115–A1116.
- TSURUTANI, B. T. and SMITH, E. J. (1974) Postmidnight chorus: A substorm phenomenon. *J. Geophys. Res* , **79**, 118–127.
- TSURUTANI, B. T. and SMITH, E. J. (1977). Two types of magnetospheric ELF chorus and their substorm dependences. Preprint of Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California (Submitted to *J. Geophys. Res.*).
- YOUNG, T. S. T., CALLEN, J. D. and McCUNE, J. E. (1973): High-frequency electrostatic waves in the magnetosphere. *J. Geophys. Res* , **78**, 1082–1099.

(1978年6月10日受理)