

ポインティングフラックス計測による  
オーロラキロメトリック放射のモードの同定  
—— “あけぼの衛星” 観測 ——

森岡 昭・大家 寛・小林 香

Polarization and Mode Identification of Auroral Kilometric  
Radiation—Akebono Satellite Observation

By

Akira Morioka, Hiroshi Ohya and Kaoru Kobayashi

**Abstract:** The first study of the Poynting flux of the auroral kilometric radiation (AKR) based on detected amplitudes and phase angle of the waveforms has been carried out with the PWS (Plasma Waves and Sounder Experiment) onboard the Akebono (EXOS-D) satellite. With the clarified information on the propagation and polarizations, the propagation mode of the AKR has been determined. The first results on the Poynting vector indicate that there is a case where the medium intensity AKR shows L-O mode propagation. The other results indicate that there is a case where sudden polarization reversal from the L-O mode to the R-X mode is associated with an explosive AKR burst. The electrostatic plasma waves are found near the local upper hybrid frequency in the source region. Though detailed studies are deferred for future study, the evidence of the observation of the upper hybrid mode waves at the very source of AKR indicates a basic necessary condition for the conversion theory.

The intensity and the direction of the AKR Poynting flux vary even over a period of 10 milliseconds. The variation of this Poynting flux suggests the very fast motion of the source location of the intense portion of the AKR.

## 概 要

“あけぼの”衛星に搭載されたPWS (Plasma Waves and Sounder Experiment) 装置によりオーロラキロメトリック放射電波の波形(振幅と位相)の計測が行われた。これによりオーロラキロメトリック放射のポインティングフラックスが求められ、伝搬モードの同定およびオーロラキロメトリック放射の発生域における波動特性が明らかにされつつある。すなわち偏波観測及びポインティングフラックス計測の結果から、中程度の強度のオーロラキロメトリック放射はL-Oモードの伝搬特性をもち、強い強度の放射はR-Xモードの伝搬特性を示すことが明らかにされた。また衛星がオーロラキロメトリック放射の発生域を通過中のデータから、オーロラキロメトリック放射のスペクトルの中には静電的プラズマ波動の成分が存在していることが示された。これ等の結果は、オーロラキロメトリック放射は、オーロラ粒子との逆ランダウ過程によって生じた静電的プラズマ波動をその源とし、この波動が電磁波への変換を受けて、自由空間波とし宇宙へ放射されるというモード変換理論を支持するものである。

## 1. 序

オーロラキロメトリック放射 (Auroral Kilometric Radiation, 以下 AKR の略称する) が発見されて以来その研究は2つの方向で進められてきたと言っても良い。すなわち、その1つは AKR の放射メカニズムの研究であり、地球や惑星の磁気圏・電離圏で生じているミクロなプラズマ過程を取り扱うカテゴリーである。他の1つは太陽風から磁気圏・電離圏へのエネルギー輸送・エネルギー変換の最終出力の1つが AKR であることから、電離圏・磁気圏のマクロな dynamics や energetics の情報をもつものとして AKR を研究する面である。

本報告では、前者の AKR 発生メカニズムの解明を目的とし、“あけぼの”衛星によるポインティングフラックス計測データから AKR の波動モードの同定を行う。

AKR の放射メカニズムに関する理論は、直接放射説とモード変換説に大きく分けられる。直接放射説(代表的なものとして[1], [2])は、オーロラ粒子が波動分散の R-X モードブランチでサイクロトロン不安定性を介してカップルするもので、R-X モードの電磁波を直接放射することが基本となる。これに対して、モード変換説([3], [4])は、オーロラ粒子によって励起された静電的プラズマ波動が電磁波に変換されるというものである。この場合プラズマ密度の不均質を介したモード変換が生じる場合には L-O モードの電磁波となり[3]、極めて強いオーロラ粒子の降下が生じている状況のもとではオーロラ粒子ビームの中で生じたプラズマ波動のドップラーシフトにより R-X モードの電磁波に変換される[5]、というものである。

さて、実際の AKR の生成のメカニズムを観測によって探るためには、AKR 波動のポインティングフラックスを偏波特性と同時に、また AKR 発生域の中での電磁界成分の検出が不可欠である。“あけぼの”衛星搭載の PWS 装置は、スペクトル及び偏波観測に加えてポ

インテイングフラックスの計測を行う機能を有している。すなわち電界2成分、磁界3成分の波形（振巾及び位相）を周波数1 kHz、帯域100 Hzの信号に変換した後、地上に伝送する観測モード（ポインティングフラックス計測モードと称する）である。詳細なPWS装置の紹介は、本報告集の別掲論文[6]を参照されたい。

## 2. AKRの伝搬モードの同定

写真1に典型的なAKRダイナミックスペクトラムを示す。衛星は、南半球の、真夜中オーロラ域（高度10,000 km）から夜明側極冠域へと飛翔していた場合の例である。図の上パネルは左廻り偏波成分、下パネルは右廻り偏波成分のダイナミックスペクトラムである。ここで偏波の定義は、衛星のZ軸すなわちスピン軸から見た電界の廻転方向として定義する。図中に周期的に出現する縦縞は、ポインティングフラックス計測モードの時間帯をあらわす。

最初の解析例として、写真1のUT2:00前後に出現しているAKRを取り上げる。この時刻には衛星は明方極冠域に位置していることから、夜側から伝搬してきているAKRを受信しているものと予想される。この現象についてUT02:17:36の波形再現データを第1図に示す。波形はoriginalのAKR周波数371.3 kHzが1 kHzに周波変換されたものである。

この波形データのEx及びEy成分からリアルタイムの偏波特性を知ることができる。第2図にこのときの偏波特性を示す。図が示すように電界はほぼ円偏波に近い左旋偏波を示している。こうしたAKRの生の電界成分ホドグラフの観測はこの実験が初めてである。

次にこのAKRの波形データからポインティングフラックスを得るために、まず伝送された波形のbest fit curveが求められ、各成分の振幅と位相が決定された。この5成分の振幅と位相のデータを用いて、観測されていないEz成分を求める。すなわち観測された電波が平面波かつ横波の電磁波であると仮定し、次式を満たす条件より求めることができる。

$$\begin{aligned} \vec{E} \cdot (\vec{k} \times \vec{E}) &= \omega \mu_0 \vec{E} \cdot \vec{H} \\ &= 0 \end{aligned}$$

こうして得られた電磁界6成分より、最終的にポインティングフラックスを求めることができる。今、注目している時刻における求められたAKRのポインティングフラックスを第3図に示す。座標系は衛星の座標系と一致するように取られている。すなわち、Z軸は衛星スピン軸であり、XY面は電界観測用ダイポールアンテナの面と一致している。第3図の求められたAKRポインティングフラックスは、衛星を後面より前面へと貫いている。すなわち左廻りの偏波をしたAKR電波が“あけぼの”の後方より伝搬してきていることを示している。この求められたAKRの偏波とポインティングベクトルの特性に加えて、衛星の姿勢を考慮することにより、受信されたAKRの伝搬モードを同定することが可能となる。第4図にこの時刻における衛星の姿勢と、南半球のAKR源位置の関係を示す。磁気地方時5時の位置でかつ高度9,000 kmの“あけぼの”衛星に対して、観測された伝搬特性（左廻り、後方からの伝搬）をもつAKRは、夜間のオーロラオーバル上空から放射されたL-OモードAKRのみであることが示される。仮にR-XモードのAKRがdusk sideから放射されたとすると、衛星に対して左廻りの偏波を示すことになるが、この場合衛星の前方からの伝搬となり観測結果を説明できない。したがってここで取り上げた例の、中程度の強度をもつ

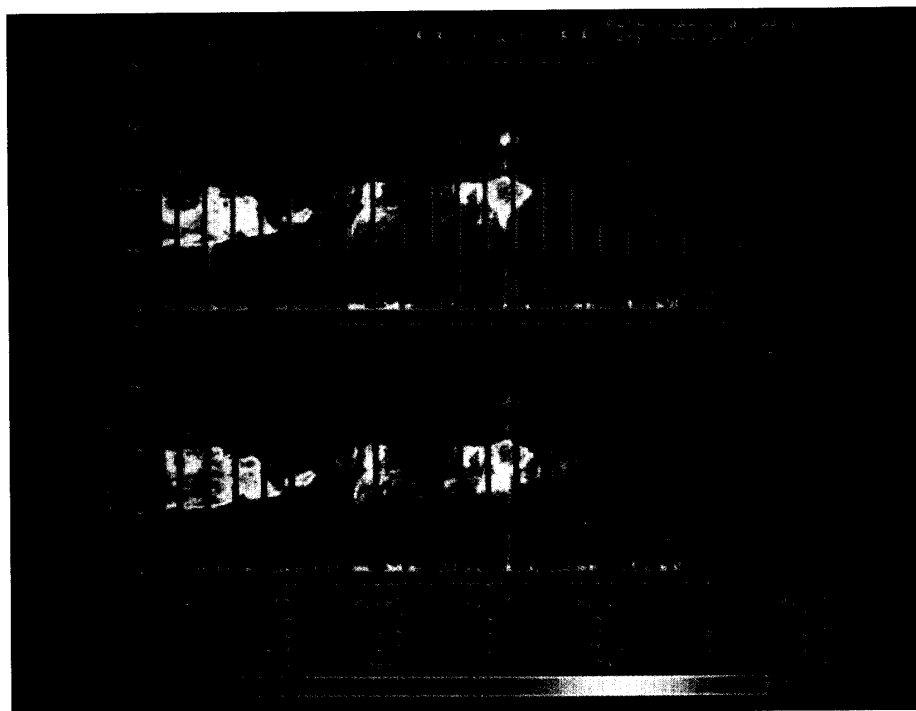


写真1 1989年6月26日、真夜中から明方の極域で観測されたAKRの偏波ダイナミックスペクトラム。上段が左廻り、下段の右廻りの偏波成分を示す。垂直の細い稿はポインティングフラックスの計測が行なわれた時間に相当する。

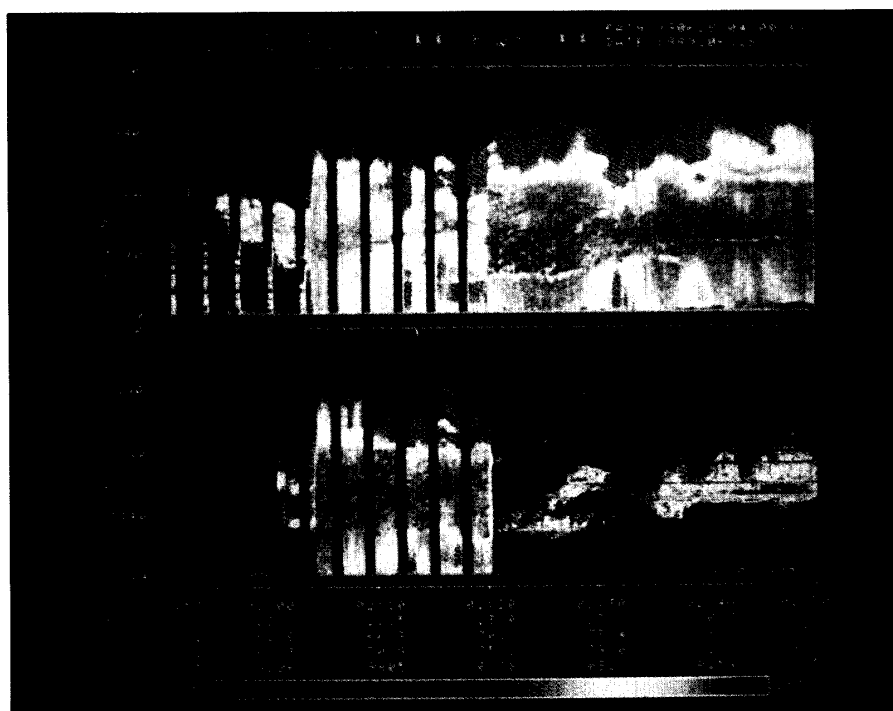


写真2 爆発的なAKRバーストが観測された例。スペクトラムの前半は、偏波とポインティングフラックスの計測モード、後半は電場成分(上段)と磁場成分(下段)のダイナミックスペクトラム計測モード。

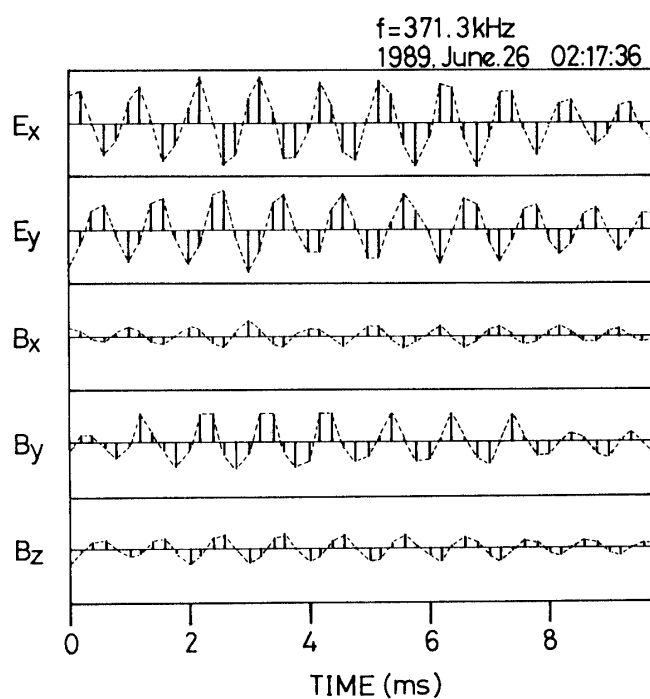


図1 写真1の02:17:36における周波数371.3kHzのAKR波形.

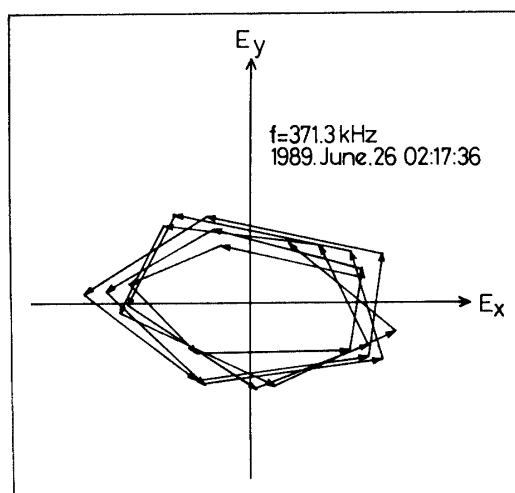


図2 UT02:17:36における電界成分( $E_x$ ,  $E_y$ )のホドグラフ. 明瞭な左廻り偏波を示している.

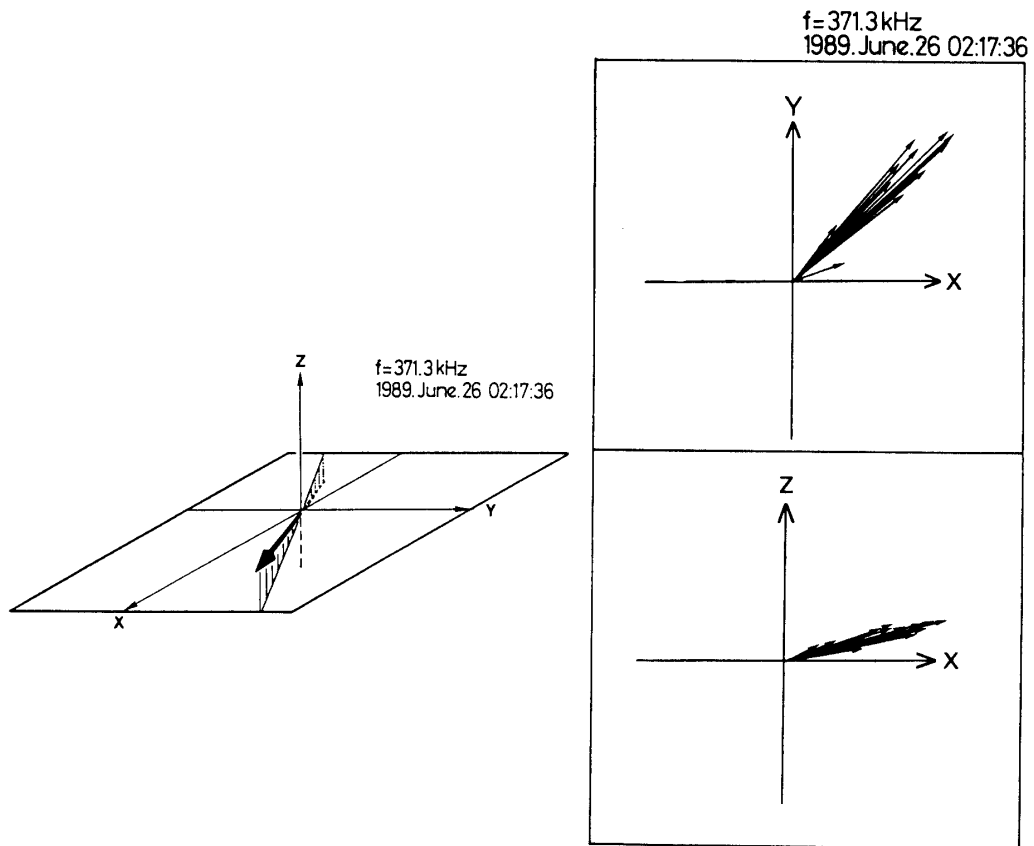


図3 UT022:17:36におけるポインティングフラックス。座標系は衛星座標系に一致する。

AKRは、L-Oモードの電磁波であることが示された。

次に非常に強いAKRバーストが生じたときの伝搬モード解析例について記す。写真2に示したダイナミックスペクトラムは“あけぼの”が磁気地方時22時、高度9,000 km、磁気緯度65°の位置にあったときに観測されたAKRバーストの例である。すなわ、UT 02:04にそれまでバンド巾200 kHzで次第にその中心周波数を下げながら強度を増していたバンド構造のAKRは、爆発的にその強度と周波数帯域を広げた。

このときのダイナミック偏波スペクトラムの低周波成分(140 kHz以下)は、強い信号の入力による受信機の飽和で生じた内部混変調によるものである。しかしこのAKRバーストの直前と直後に行われていたポインティングフラックス計測モードでは、このモード時の受信機バンド巾が100 kHzであることから飽和現象は生じていないことが確認されている。尚、写真2のUT 02:20以降のスペクトラムは、それまでの偏波とポインティングフラックス計測モードから、電界(上部パネル)と磁界(下部パネル)のスペクトル観測モードへと切り換えたものである。

まず爆発的なAKRバーストが発生した前後の偏波の比較を行う。写真2の偏波ダイナミックスペクトラムを見ると、AKRバーストが生じる前は左旋波の強度が卓越していたのに対し、AKRバーストが生じた後は右旋波の強度が非常に強くなっていることがわかる。このことを更に詳細にAKRバーストが発生した直前と直後のポインティングフラックス計

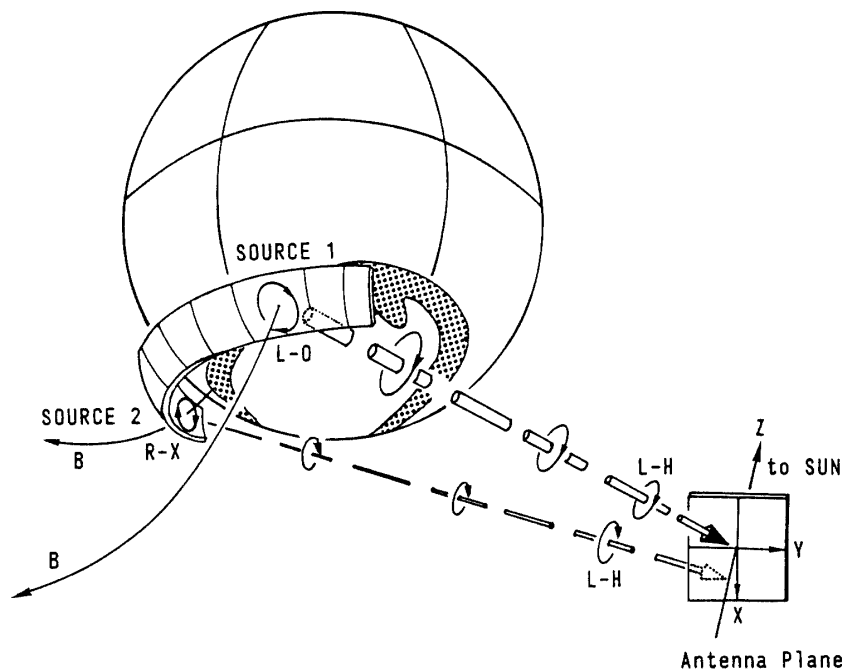


図4 南半球のAKRのSource regionと衛星の姿勢の関係。偏波とポインティングフラックスの計測の結果と衛星の姿勢とからL-OモードのAKRのみが、1989年6月26日UT02:17:36のAKRの伝搬モードとして説明される。

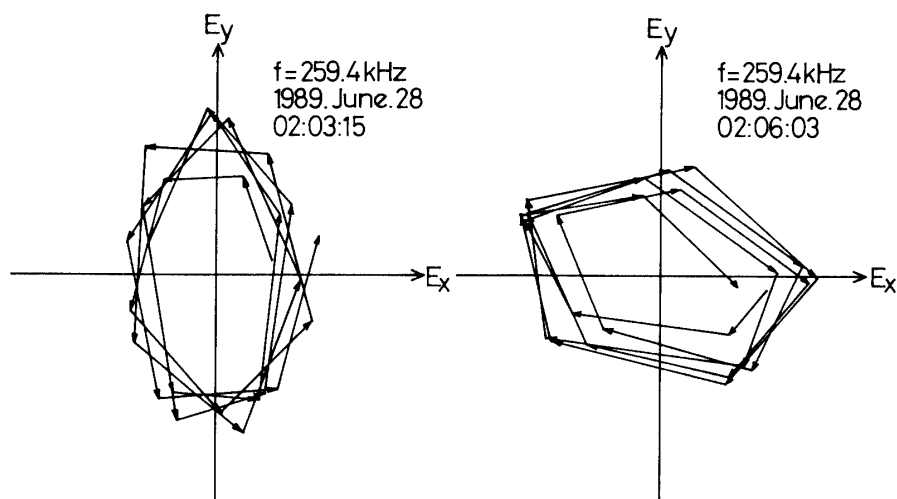


図5 爆発的AKRバーストの前後の電界成分ホドグラフ。バーストの前後で偏波が左廻りから右廻りへ変化したことが明瞭に示される。

測のデータによって調べる。第5図左にはバースト発生直前の、同図右にはバースト発生直後の電界成分のホドグラフを示す。図から明らかなようにAKRの爆発的なバーストの発生の前後で左旋円偏波から右旋円偏波へと明瞭な変化を示した。このことは大きな振幅をもつ

AKR バースト放射の伝搬モードが、その直前まで出現していた中程度の強度の AKR と逆のモードになったことを示している。しかしここで言う右・左旋偏波とは前述したように衛星の座標軸 Z (スピン軸に一致) からみた電界の旋回方向であるため、波動モードを明らかにするには、ポインティングベクトルの方向とを同時に見ることが必要となる。

第6図にこのバースト発生直後のポインティングフラックスを示す。同図左の三次元的に示されたポインティングベクトルから、この時の AKR は衛星の前方から到達していることがわかる。また同図右のポインティングフラックスの時間変動の図からは、特に X-Y 平面に投影されたベクトルの時間変動が大きいことがわかるが、これは強い AKR の源域 (source region) が激しく変動していることを表しているのであろう。さて次にこれ等の偏波・ポインティング計測の結果と衛星の姿勢から、注目している時刻の AKR の伝搬モードの決定を行う。第7図に磁気地方時 22 時の子午面に投影された軌道面と第6図に対応する時刻の衛星、アンテナ面の姿勢を示す。観測された AKR バーストが“あけぼの”の前面から右廻りの偏波をもって南半球で観測された事実は、このときの AKR 伝搬モードは唯一 R-X モードであると結論される。

以上、中程度の強度と強い爆発的 AKR バーストについて行ったポインティングフラックスによるモード同定は、前者は、L-O モードを示し、後者は R-X モードを示すという結果が得られた。

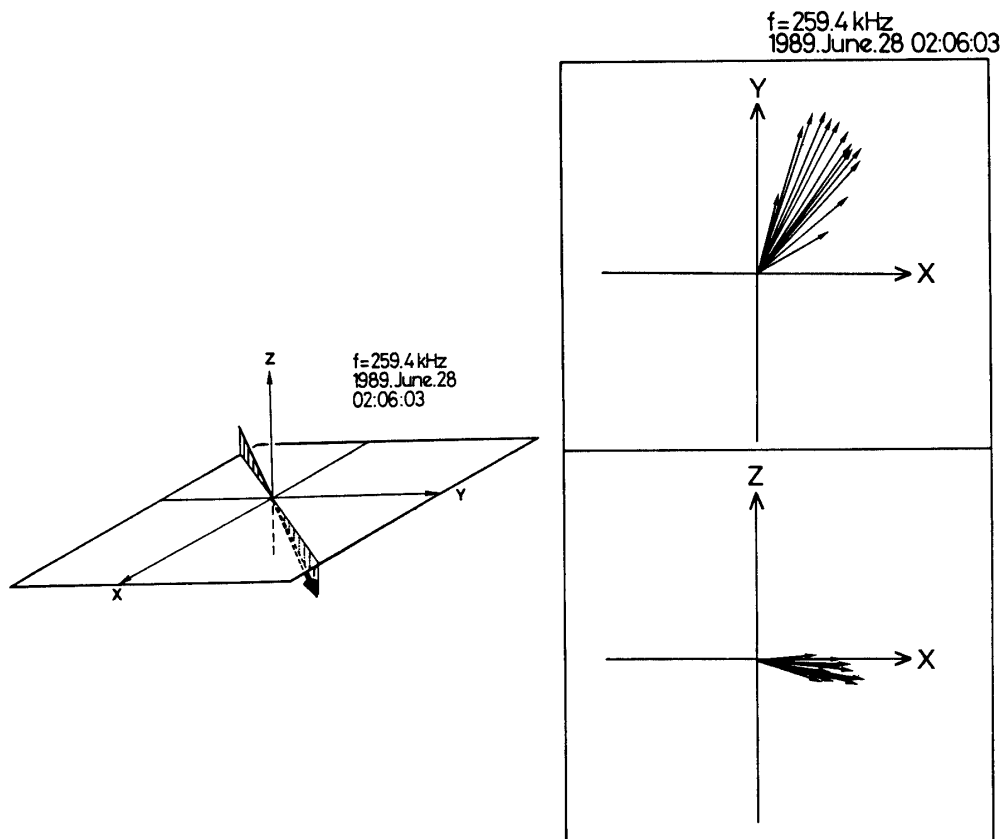


図6 1989年6月28日 UT02:06:03におけるポインティングフラックス。



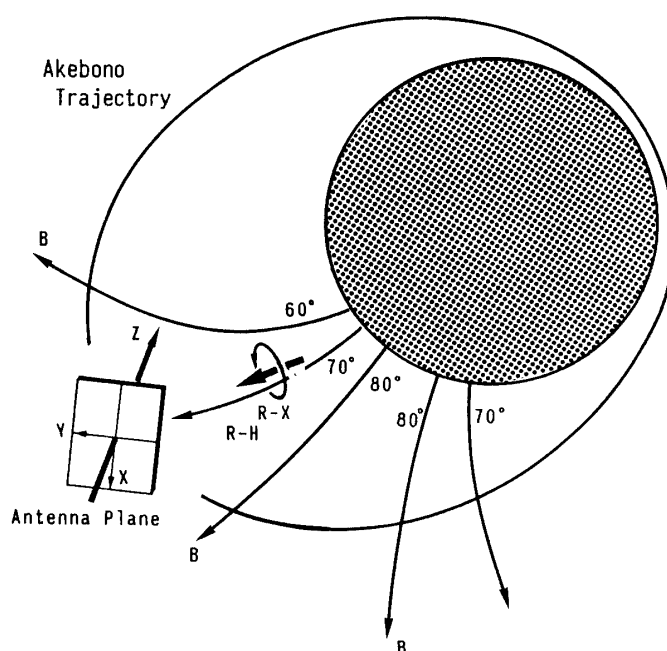


図7 第6図の観測時における“あけぼの”の姿勢と軌道投影図. AKRバーストはR-Xモードの伝搬モードをもつことが示される.

### 3. AKR源域における静電波成分の存在

AKRの源域 (source region) においてそのスペクトラムの中に静電波成分が存在するか否かを明らかにしていくことは、AKRの発生のプロセスを観測的に検証する上で極めて重要な意味をもつことは序章でも述べたとうりである。

“あけぼの”衛星は、しばしば pre-midnight 域から midnight のオーロラ帯上空でシャープなカットオフを持ったAKRスペクトラムを観測する。写真1でUT 01:45時頃のスペクトラムはこの典型例の1つである。すなわち、invariant latitude  $73^\circ$ 、磁気地方時0.1時、高度10,000 kmの高度において、約140 kHzに鋭いカットオフをもつAKRが受信されている。この鋭いカットオフ周波数のすぐ上の周波数域に強い強度をもつバンド構造のエミッションが見られる。このバンド構造のエミッションは静電的プラズマ波動成分であることを以下に示す。今、このエミッションが出現しているUT 01:49について縦軸にfield intensityを、横軸に周波数を取った強度スペクトラムを第8図に示す。周波数140 kHzから380 kHzに亘ってAKRのスペクトラムが強い強度をもって出現しているが、このスペクトラムの下端は鋭いカットオフを示す。

そしてこのカットオフのすぐ上の周波数域には、図中にハッチした部分で示す強いバンド状エミッションがAKRスペクトラムの一部として観測されている。このバンド状エミッションの上限と下端の周波数はその場の高域混成共鳴周波数 (upper hybrid resonance frequency) とプラズマ周波数であることからupper hybrid modeの静電的プラズマ波動であると同定される。すなわち、第8図のスペクトラムは“あけぼの”衛星が、伝搬して来る

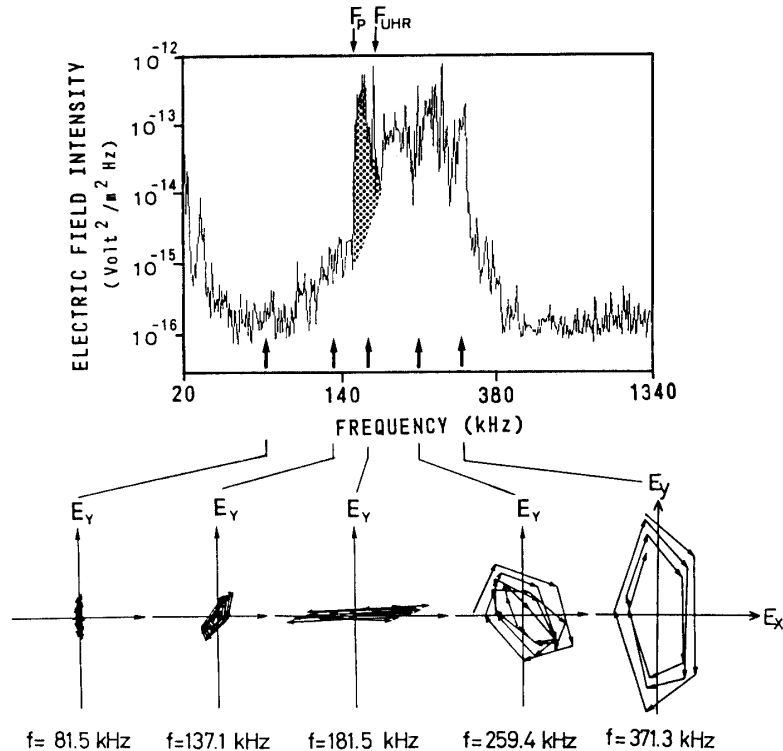


図8 1989年6月26日01:50:24のAKRスペクトル(上段)及び電界成分ホドグラフ(下段). プラズマ周波数( $f_p$ )と高域混成周波数( $f_{UHR}$ )にはさまれたハイブリッドモードの静電的波動の存在が示される.

電磁波成分のAKRと、衛星近傍で生成されている静電的成分のAKRとの両方を観測したことを示している。さらにこのことを検証するためAKRのスペクトラム中の偏波特性を第8図の下段に示す。AKRの高い周波数成分の偏波は円偏波成分を示し電磁波の伝搬特性を示しているのに対し、upper hybrid周波数域の偏波(周波数181.5 kHz)は明らかな直線偏波となっており静電波であることを示している。この周波数における電界と磁界の強度比( $E/B$  ratio)を示したものが第9図であるが、磁界強度は電界強度に比べて極めて小さく、やはりこの周波数成分は静電的プラズマ波動であることが確認される。

#### 4. 結論

AKRの発生機構を観測から明らかにしていくには、AKRが放射されるプロセス(背景となるプラズマ状態とAKRの強度)をその伝搬モードの同定とを同時に行うこと及び、AKRのsource regionにおいて局所的静電的プラズマ波動がAKRのoriginとして存在しているか否かを調べるのが本質的である。“あけぼの”衛星に搭載されたPWS(Plasma Waves and Sounder Experiment)は、こうした観点から自然プラズマ波動のスペクトル及び偏波観測に加えてポインティングフラックスの計測を行った。本論文では、初期観測データをもとにAKRの放射機構の解明を目的としてAKRの伝搬モードの同定及びAKRの

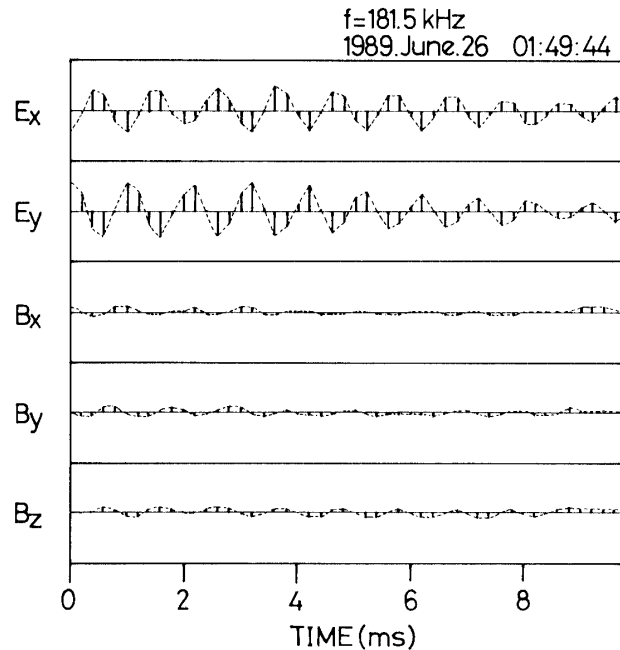


図9 第8図の周波数181.5KHzにおけるAKR波形。  
磁界成分が電界成分に比べて極めて小さいことから  
波動は静電的プラズマ波動成分と同定される。

source域における波動のモードの決定を行った。その結果、中程度の強度をもって放射されたAKRはL-Oモードの伝搬特性を示し、強い爆発的AKRバース出現時にはR-Xモードの波動として観測されることを明らかにした。更にAKRの放射域の中の観測から、AKRのスペクトラムの中には、局所的な静電波成分が含まれていることを示した。

こちらの観測事実は、第一章で述べた相対する二つのAKRの放射理論のうち、モード変換理論を支持する。

### 謝 辞

EXOS-D (AKEBONO) 衛星の実験を成功させ一連の観測を遂行していくにあたり、EXOS-D/M-3S-II班全員の方々の努力と支援に深く感謝いたします。又機器製作に協力いただいた明星電気(株)の方々の努力に感謝すると共に、AKEBONO追跡班のスタッフの方々に深く感謝いたします。

### 参 考 文 献

- [1] Wu, C.S., and L.C. Lee, A theory of the terrestrial kilometric radiation, *Astrophys. J.*, 230, 621-626, 1979.
- [2] Melrose, D.B., An interpretation of Jupiter's decametric radiation and the terrestrial kilometric radiation as direct amplified gyroemission, *Astrophys. J.*, 207, 651-662, 1976.
- [3] Oya, H., Origin of Jovian decameter wave emission-Conversion from the electron cyclotron

- plasma wave to the ordinary mode electromagnetic wave, *Planet. Space Sci.*, 22, 687–708, 1974.
- [ 4 ] Jones, D., Source of terrestrial nonthermal radiation, *Nature*, 260 686–689, 1976.
- [ 5 ] Oya, H., and M. Iizima, Conversion mechanism of Z-mode waves as the source of auroral kilometric radiation by the relative plasma motion, submitted to *Radio Sci.*
- [ 6 ] Oya, H., A. Morioka, M. Iizima, T. Ono, H. Miyaoka, T. Obara, and K. Kobayashi, Plasma wave observations and sounder experiments (PWS) using Akebono (EXOS-D) satellite—Instrumentation and initial results including discovery of the high altitude equatorial plasma disturbance, This issue.