

## あけぼの衛星による HIPAS/VLF 変調波観測協同実験

木村 磐根\*・岡田 敏美\*\*・長野 勇\*\*\*

橋本 弘藏\*\*\*\*・石田 薫\*・伊藤 嘉彦\*

A. Wong<sup>††</sup>・B. Chouinard<sup>††</sup>・M. Mccarrick<sup>††</sup>・W. Wuerker<sup>††</sup>

## Collaborative Experiments of HIPAS/VLF Modulation by using Akebono Satellite

By

I. KIMURA, T. OKADA, I. NAGANO, K. HASHIMOTO, K. ISHIDA, Y. ITO,  
A. WONG, B. CHOUINARD, M. MCCARRICK, AND W. WUERKER

**Abstract:** This paper reports the results of collaborative experiments between UCLA and Akebono VLF team, using HIPAS HF transmitter and Akebono satellite. In these experiments, the HIPAS transmitter amplitude modulated by a VLF frequency creates a VLF current in the ionospheric heated region, from where the VLF waves are radiated toward the ground and to the magnetosphere. In 1989, two campaigns were made. While the VLF waves associated with HIPAS transmission were often observed on the ground, at the satellite the wave was observed only once. This rare chance of signal detection at the satellite means that the VLF waves are not always isotropically radiated from the current in the lower ionosphere. The signal intensity observed at the satellite was a reasonable value as compared with that observed on the ground.

### 1. 緒言

EXOS-D 衛星のプロジェクトが進みつつある1988年, UCLA の A. Wong 教授来日の機会に, 同教授の実験施設であるアラスカ・フェアバンクスの HIPAS (High Power Active Stimulation) 装置を利用した EXOS-D 搭載の VLF 装置との協同実験の計画が討議され,

---

\* : 京都大学工学部

\*\* : 富山県立大学工学部

\*\*\* : 金沢大学工学部

\*\*\*\* : 東京電機大学工学部

†† : Dept. of Physics, UCLA

1989年度の科学研究費海外学術研究のプロジェクトとして申請したが、幸い EXOS-D 衛星の打ち上げが成功し、かつこの科研費の申請も承認されたので、1989-1990年度の協同実験プロジェクトとして初年度8月からスタートした。これまで初年度に2回 (Kimura et al, 1991b), 2年度には6月に第3回目の実験を行った。本実験は、HIPASのHF帯の大電力送信波(周波数2.85MHz)にVLFの振幅変調をかけた電波で下部電離層を加熱し、加熱された部分の導電率が増加することにより電離層中のDC電界によりVLF帯の交番電流が流れるため、その周波数の電磁波が放射されることから、この電波を衛星並びに地上で同時に受信しようとするものである。このような実験はこれまで Tromsø にある Max Planck の HF 帯送信機と ISIS その他の衛星および地上観測装置を用いて行われているが、衛星では電界強度のみの観測であること、地上観測で得られた電磁界強度との consistency が良くないこと等の結果となっている (James et al., 1984; 1990)。今回の EXOS-D (あけぼの) による VLF 観測装置では、アナログテレメータによる広帯域のダイナミックスペクトルが得られるほか、伝搬ベクトル方向の測定が出来るので (Kimura, et al., 1990), これまでの観測結果での問題点が明らかにされるものと期待された。本論文では特に昨年度 (1989) に行われた実験結果について報告する。

## 2. 実験設備

### 1) HIPAS 設備

HIPAS 送信設備はフェアバンクス市の東方約50kmの郊外にあり、中心に1本、周囲に7本の直交八木アンテナを配した円形(直径104m)アレイアンテナである。8本のアンテナを同相励振した場合のビーム幅は $21.5^\circ$ 、各アンテナの放射電力は2.85MHzの周波数に対し125kWで、垂直方向の等価放射電力(EIRP)は約80MWとなる (Wong et al., 1990)。8本のアンテナ中4本のアンテナの位相を反転することにより、垂直方向の放射電力を7dB程度減少させることが可能で、このことを用いて信号のオン-オフを行うことにも利用される。これらの送信電力を賄うため、1MWのディーゼル発電機2台による電力を利用しており、上記の送信を数時間にわたって連続運転も可能である。これらのHF帯の送信波をVLFまたはELFの信号で変調することが出来る。1kHz程度以上の周波数による場合はいわゆる振幅変調(AM)が可能であるが、ELF帯では、前述のようにビーム方向を振ることにより(dephaseまたはDPという)、等価的にビームにELF帯またはVLF帯の正弦波の信号により変調をかける。

### 2) 地上VLF観測

HIPAS 送信設備の西北約35kmの位置に NOAA の衛星追跡局があり、その構内に VLF 地上観測の直交1回巻ループアンテナ(2m×2m)を設置し、オメガ信号を含む15kHz以下の広帯域のダイナミックスペクトルを観測し、タイムコードとともに DAT テープにデジタル記録された。

### 3) あけぼの衛星搭載のVLF受信装置

衛星搭載機器の詳細は EXOS-D 中間報告、科学衛星 EXOS-D (M-3SII-4) 計画書、および J.G.G. の EXOS-D 特集号 (Kimura et al., 1990) に詳しく記述されているが、今回使用した機器は特に、14kHz以下のダイナミックスペクトルを観測する広帯域受信機(WBA)

(Uテレメータによる)と、電界2成分、磁界3成分により伝搬ベクトル、ポインティングベクトル方向を算出できる PFX 受信機である。PFX は100Hz から12.75kHz の間の1周波数を50Hz 間隔でコマンドにより選ぶことが出来るモードがあり、HIPAS 実験にはこのモードを使用した。実際には地上 VLF 観測の結果、周辺の雑音レベルがもっとも低いのは2.5kHz 付近であることが分かったので、HIPAS 信号の変調周波数を2.5kHz に選んだ。従って、あけぼの VLF の PFX 受信機としても、受信周波数として2.5kHz を選ぶこととなった。

あけぼの搭載の VLF アンテナの実効長についてであるが、ループアンテナは地上テストで測定されているのでその出力電圧から磁界強度を計算できる。一方、ワイヤーアンテナについては実効長の測定は出来ていないため、全長60mのうち両側各3mがシールドされているのでこれを差引き、その半分27mを実効長としている(アンテナ長が波長に比べて十分短い場合、アンテナ上の電流分布を3角分布と仮定することにより実効長は全長の半分となる筈であるが、この点については尚議論がある。Sonwalkar and Inan, 1986)。プリアンプの入力インピーダンスは100pFであり、アンテナのシースを含むインピーダンスはあけぼの搭載の VLF 帯ベクトルインピーダンス測定装置(VIP)により測定した値を用いることにより電界アンテナチャンネルの出力電圧から電界強度を算出できる。またこれらの電磁界成分の絶対値と位相を用いて、地上でのデータ処理により到来波の伝搬ベクトル方向と、ポインティングベクトルが計算できる。

#### 4) あけぼの衛星のテレメータデータ取得

あけぼの衛星のUおよびSバンドのテレメータ受信はカナダのプリンスアルバート(PA)局にお願いすることを前提に考えていたが、最初のキャンペーンでは、フェアバンクス上空であけぼの perigee に近かったため、HIPAS 構内にあるヘリカル1素子のUHFアンテナによるテレメータ受信を試みたが、アンテナの利得不足と、プリアンプのNFが十分でなかったため、この設備での受信は成功しなかった。従って第2回目からは専らPA受信に頼ることとした。

### 3. 1998年11月28日の観測結果

#### 1) 衛星観測

これまでに行った3回のキャンペーン、すなわち1989年8月の第1回目、同年11月下旬から12月初旬にかけての第2回目、及び1990年6月に行われた第3回目を通してあけぼので HIPAS の VLF 変調信号が受信されたのは昨年11月と本年6月の計2回だけである。HIPAS 付近では、幸い衛星が HIPAS を通る磁気子午面に非常に近い軌道を通るので受信されるチャンスが高いと考えたのであるが、実際に受信されたのは観測軌道数で言うと全体としては10%位になるであろう。

HIPAS からの電波の送信はあけぼのが HIPAS を通る磁力線にもっとも近くなると予想される時刻のプラス・マイナス30分、計60分程度行われ、実際に信号が観測出来たのは、高度2,300kmで約60秒間、高度9,700kmで約120秒間であったから、軌道予測の誤差だけで先の低い受信率を説明できない。むしろ HF 加熱により、電離層電流がいかにか効率良く流れるかに依存するのであろう。

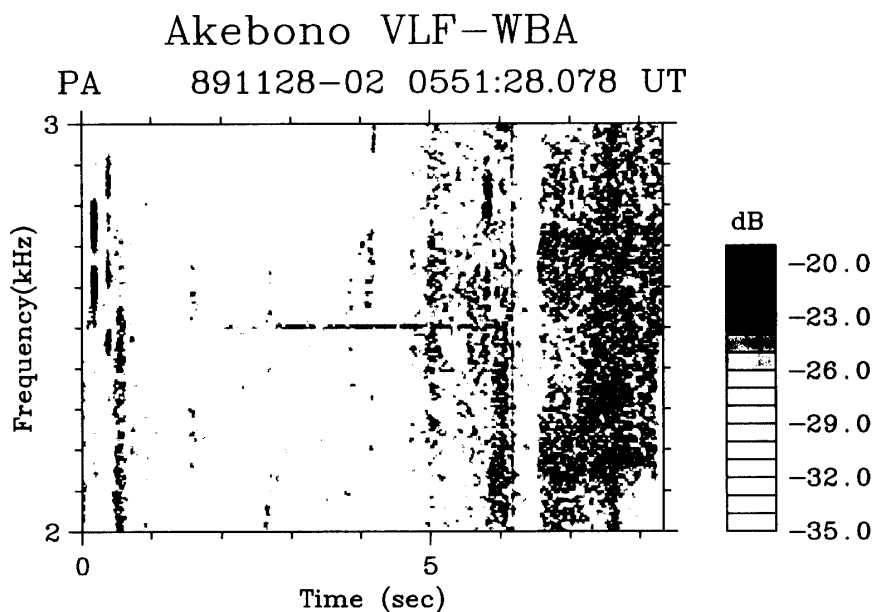


図1. 1989年11月28日05:51:30UT にあけぼの搭載の VLF/WBA で観測された HIPAS VLF 変調信号 (2.5kHz) のダイナミックスペクトルの1例.

#### Akebono (EXOS-D) Orbit (in geographic coordinate)

89.11.28 0545 - 0600 UT

( 1256km, 42.07°N, 163.61°W) at 0545 UT

( 3640km, 74.54°N, 107.89°W) at 0600 UT

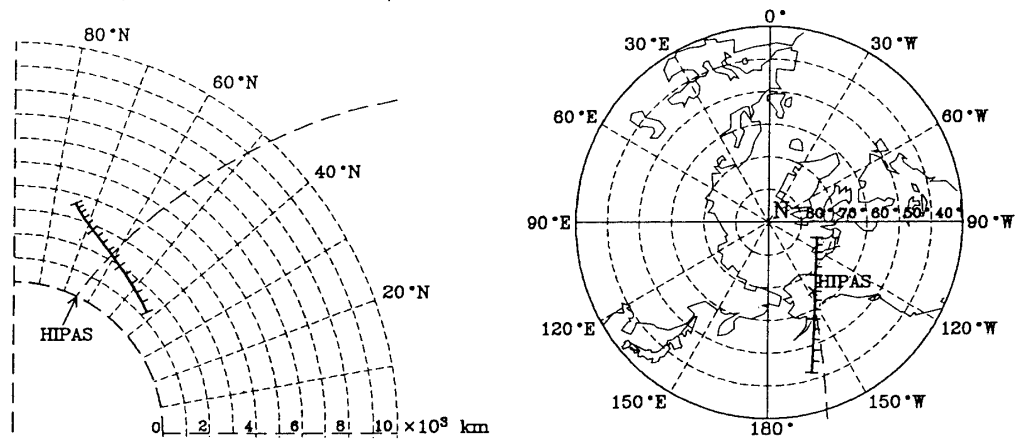


図2. 第1図に対応するあけぼのの軌道と、HIPAS を通る磁力線との相対関係。衛星高度は2,300km。信号が受信されたのはほぼHIPAS を通る磁力線上である。

第1図は昨年11月28日05:51:30UT 頃にあけぼの搭載の VLF/WBA で観測された HIPAS の VLF 変調信号 (2.5kHz) のダイナミックスペクトルの1例である。受信に用いられたのは全長60mのワイヤーアンテナであり、電界成分である。

また第2図にはこのときのあけぼのの軌道と、HIPAS を通る磁力線との相対関係を示し

## Akebono VLF-PFX 891128

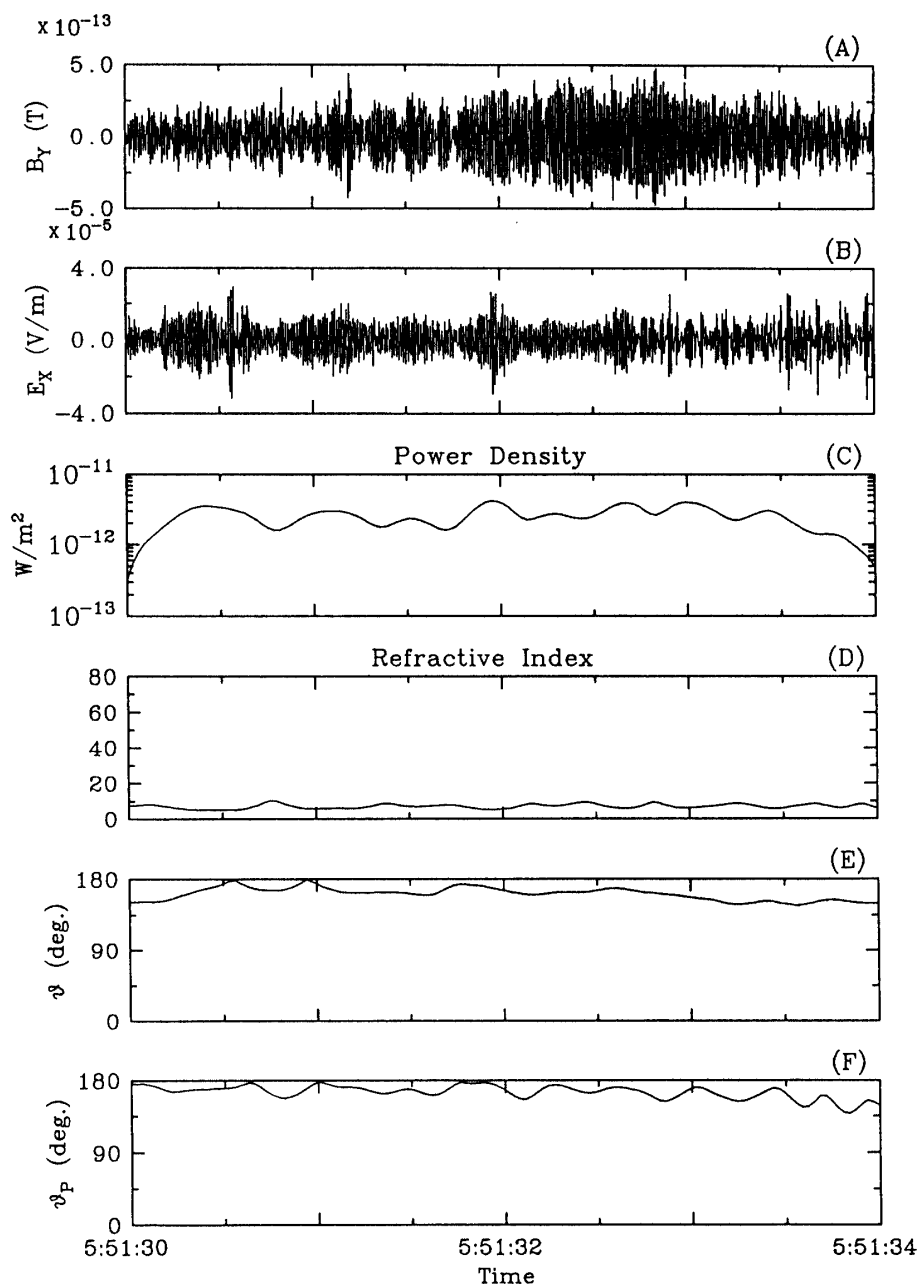


図3. あけぼの衛星上で測定された信号の  $B_Y$  成分,  $E_x$  成分, および電力密度, 屈折率, 磁力線と伝搬ベクトルとのなす角  $\theta$  (degree), およびポインティングベクトルと磁力線とのなす角  $\theta_p$  (degree).

ている。衛星高度は2,300km, 信号が受信されたのはほぼHIPASを通る磁力線上であることが分かる。

一方あけぼの搭載のPFX受信機では磁界3成分と、電界2成分を観測し、それにより電界・磁界成分の絶対値、伝搬ベクトル方向、屈折率、ポインティングベクトル方向を求めることが出来た。第3図には測定された $B_y$ 成分と $E_x$ 成分、および電力密度、屈折率、磁力線と伝搬ベクトルとのなす角 $\theta$  (degree), およびポインティングベクトルと磁力線とのなす角 $\theta_p$  (degree)を示す。電界強度は約 $15\mu\text{V/m}$ , 磁界強度約 $0.25\text{pT}$ で電力密度は $3 \times 10^{-13}\text{W/m}^2$ , 屈折率は7程度であり、伝搬ベクトルは上向きで、磁力線とのなす角は $20^\circ$ 程度、ポインティングベクトル方向も上向きで磁力線とのなす角は $10^\circ$ 以下であることがわかる。

このときには送信のモードとしては5秒間垂直ビーム(オン), 次の5秒間は先述のDP時に対応したビームとしている。この2つのモードのビームパターンを計算すると第4図(a)および(b)の様になり、DP時には垂直方向の放射電力は確かに減少するが、垂直からずれた方向に結構大きな電力が放射されており、かなり広範囲の電離層がやはり加熱されていると考えられる。従って、衛星でも第1図の場合にはオン時に対応して信号が受信されているが、前後20秒程離れた時刻ではむしろDP時に対応した時刻で信号が受信されている。

## 2) 地上観測結果

第5図には前記の衛星観測とほぼ同時刻の地上観測からえられたVLF変調信号周波数2.5kHzおよび、第2, 第3高調波の周波数に対する信号強度を示している。また地上観測の絶対時刻を知るために受信したノルウェーのオメガ信号(12.1kHz)の強度も示している。この信号を参照して衛星迄の伝搬時間を見積ることができる。

まず地上で受信された信号強度レベルは、送信モードのオン時に1.3pT, DP時には-6dBとなる。一方、5kHz, 7.5kHzではオン時の信号強度は0.13および0.4pTであり、DP時にはそれぞれ-18dB, および-16dBだけ下がる。これらの観測結果からまず言えることはオン時には基本波に対する、第3高調波の強度が約1/3という点は、HIPAS送信信号のVLF変調がduty ratio 1/2の矩形波とすると大変もともらしい値となっていることで

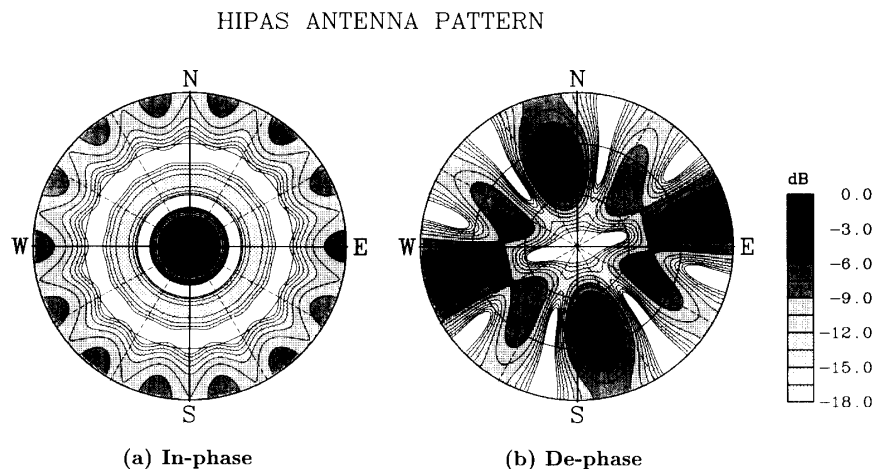


図4. (a)送信アンテナ8本同相垂直ビームのアンテナパターン  
(b)4本逆相時(DP)のアンテナパターン。

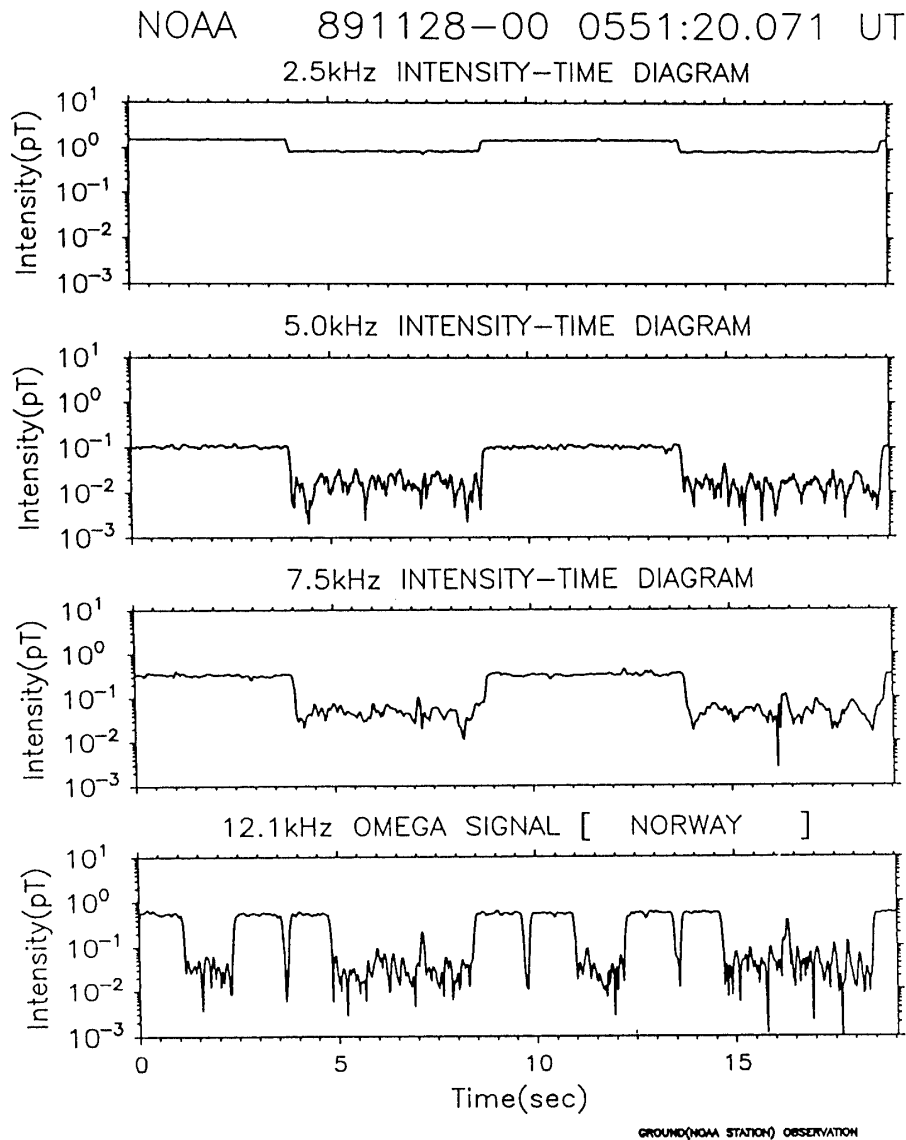


図5. 1989年11月28日0551:30UT頃の地上観測から得られた基本周波数(2.5kHz), および第2, 第3高調波の周波数に対する信号強度.

ある。また、第2高調波は基本波の10%もある点については変調波が完全な矩形波でなかったとみるか、電離層内の非線形性によるかどちらかであろう。

一方、DP時にはオン時と比べてどれだけ下がるかについて着目すると、基本波では-6dBに対して、第2, 第3高調波では-18, -16dBとなるという点は簡単には理解できない。この解釈として、一つは、変調したVLF信号が電離層の加熱領域から放射される機構が非線形であると考えられるので、放射効率が周波数依存性を持つと考えられる点であり、もう一つの可能性として、DP時にはビームが広がって加熱域が広がるため、高い周波数では電流領域が波長に比べて大きくなりすぎて放射効率が下がるとも考えられる。これとも関連して、第6図には衛星観測が成功した日の翌日11/29, 0550 UTから15分間の地上観測結果

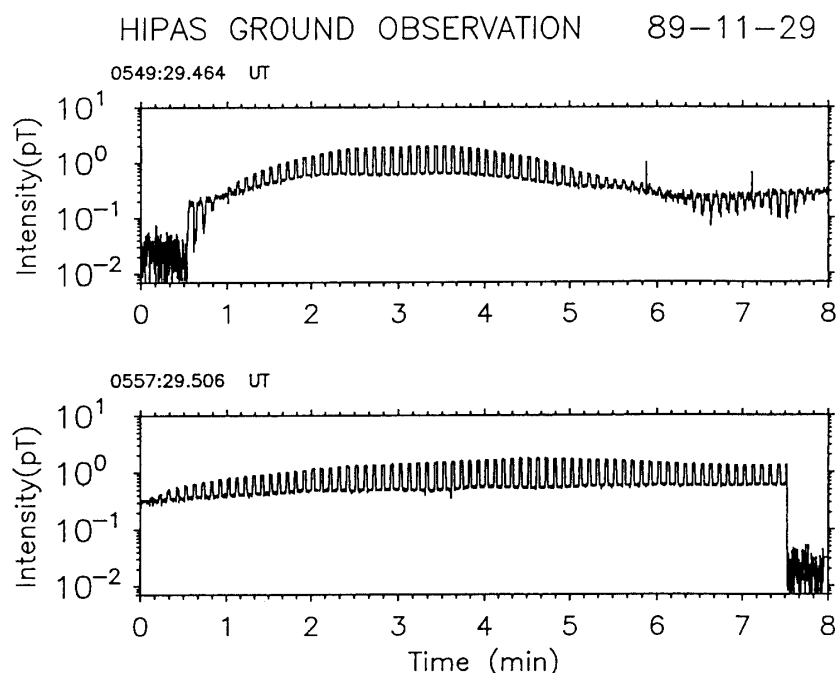


図6. 1989年11月29日0550UT から15分間の地上観測における信号  
(2.5kHz) 強度変化.

(2.5kHz) を示す. これを見ると, オン時よりも DP 時の方が信号強度が強くなること  
あり (最初の30秒間, 及び6~8分の間), これは DP 時には電離層加熱領域が広がるため,  
2.5kHz では垂直ビームより放射効率が高くなることを示しているものと思われ  
る.

#### 4. 検 討

Tromsø の送信設備により, VLF 波 (0.5~4 kHz) で変調した実効放射電力約270MW  
の強力な電波により加熱された電離層領域を流れる VLF 周波数の電流から放射された VLF  
電波を, 約1,100km 高度の ISIS 1 により観測した結果 (James など, 1984) では, 電界強  
度が平均200 $\mu$ V/m, 最大値2.6mV/m と報告している. また, 地上の VLF 観測では約 2 pT  
とのことである. 彼らは地上強度から高度100km に存在すると仮定した電離層電流を無限  
直線電流と見なしたときの電流値を 1 A と見積り, この電流から電離層プラズマ中を上方に  
放射される電磁波の高度1,100km における電力密度を計算し, これらが衛星で観測された  
値より 2 桁以上大きいことを報告している.

一方, 我々の観測では, 地上での信号の磁界強度は1.3pT, また高度2,300km における衛  
星での信号強度は第3図に示したように, 電力密度にして約  $3 \times 10^{-12} \text{W/m}^2$  となる. まず  
地上観測された信号強度を, 単純に電離層中の一様な無限長直線電流によるとしたときの電  
流は約0.65 A となる. この電流 (VLF 周波数の電流) がプラズマ中を上方向に放射される  
電磁波強度を, James 等 (1984) の計算を利用して我々の場合に当てはめて見ると, 上記の  
電力密度は2,300km の高度では約  $3 \times 10^{-11} \text{W/m}^2$  となる (Kimura, et al., 1991). この値は



我々の衛星での観測値より一桁大きい、電・磁界強度にすると factor 3 の違いであり、James 等の (1984) の結果より差はかなり小さい。また、彼らの衛星観測は電界のみであるが、我々の場合は電界、磁界共に測定し、これらの値から求められる屈折率と、衛星上で測定されるプラズマ密度を用いて計算した屈折率がおおよそ一致していることから、我々の衛星上での信号強度の観測値の信頼性が高いといえる。また、衛星上で観測された電磁界の 5 成分から求められた伝搬ベクトル、ポインティングベクトル方向も大変もともらしい結果であることは更に衛星観測結果の信頼度を上げるものである。

これらのことから、今回の衛星、地上同時観測結果は、ISIS 1 での観測結果の問題点の原因を明らかにしたことにはならないが、衛星、地上強度に consistency があることが判ったことは大きな収穫である。

## 5. 結 言

本実験は最初に述べたように 2 か年のプロジェクトとして計画され、初年度第 1 回目の実験では岡田敏美が地上受信機を製作し、木村磐根、橋本弘藏、長野 勇、山本正幸が HIPAS site に赴き、地上観測装置の設置と衛星による同時観測を試みた。地上観測では豊富な興味あるデータがえられたが、衛星観測は成功しなかった。第 2 回目の実験では木村磐根と岡田敏美が参加し、岡田敏美は Prince Albert であけぼの衛星の追跡を担当し、木村磐根が HIPAS 送信及び地上観測を担当した。第 2 回目には同時地上観測と共にあけぼの衛星での受信および、信号の伝搬ベクトル、ポインティングベクトル方向の観測にも成功した。特にこれまで ISIS 衛星で観測された地上と、衛星での信号強度の inconsistency が、我々の観測ではそれほどないことがわかったが、逆にそれでは彼らの結果をどう解釈すべきかという問題が残っている。今後も更に共同実験を行うので、それらの結果を総合して、改めて検討することになる。

なお、これらの協同観測から、地上では、信号強度の強弱はあるが、HIPAS の送信に対していつでも VLF 信号が受信できるのに対して、衛星での信号検出が意外に難しいことが判った。これは電離層中に作られた VLF 電流からの電波放射が必ずしも等方的でなく強い指向性を以て放射されるため、その通路が必ずしも衛星の位置を通らないということによるのかも知れない。これも今後の多数回の実験で確かめたい。

謝辞 この協同観測はフェアバンクス市郊外にある HIPAS の設備を利用したものであり、HIPAS 実験場の W. Huhn および R. Dickman 両氏の協力に感謝する。また衛星の追跡は鶴田教授始め宇宙科学研究所あけぼの追跡チーム、および Prince Albert 局の方々によって行われたもので、これらの方々を負うところが大きい。衛星の軌道予測その他この実験の国内でのバックアップとして佐藤 亨講師の協力に感謝する。衛星観測データの物理的理解のためにあけぼの衛星で同時観測された電子密度、地球磁場強度のデータを使用した。これらはそれぞれ PWS 班、MGF 班から提供されたものであり、これらの担当者に謝意を表す。

このプロジェクトは文部省科学研究費国際学術研究 (No.01044070) によったものである。

## 参 考 文 献

- [1] James, H.G., R.L. Dowden, M.T. Rietveld, P. Stubbe, and H. Kopka, Simultaneous observa-

- tions of ELF waves from an artificially modulated auroral electrojet in space and on the ground, *J. Geophys. Res.*, 893, 1655–1666, 1984
- [ 2 ] James, H.G., U.S. Inan, and M.T. Rietveld, Observations on the DE 1 spacecraft of ELF/VLF waves generated by an ionospheric heater, *J. Geophys. Res.*, 958, 12,187–12,195, 1990
- [ 3 ] Kimura, I., K. Hashimoto, I. Nagano, T. Okada, M. Yamamoto, T. Yoshino, H. Matsumoto, M. Ejiri and K. Hayashi, VLF observations by the AKEBONO satellite, *J. Geomag. Geoelectr.*, 42, 459–478, 1990
- [ 4 ] Kimura, I., A. Wong, B. Chouinard, T. Okada, M. McCarrick, I. Nagano, K. Hashimoto, R. Wuerker, M. Yamamoto and K. Ishida, Satellite and ground observations of HIPAS VLF Modulation, *Geophysical Research Letters*, 18, 309–312, 1991
- [ 5 ] Sonwalkar, V.S. and U.S. Inan, Measurement of Siple transmitter signals on the DE 1 satellite: wave normal direction and antenna effective length, *J. Geophys. Res.*, 91, 154–164, 1986
- [ 6 ] Wong, A., J. Carroll, R. Dickman, W. Harrison, W. Huhn, B. Lum, M. M. McCarrick, J. Santon, C. Schock, G. Wong and R.F. Wuerker, High power radiating facility at the HIPAS observatory, *Radio Sci.* 25, 1269–1282, 1990