

# 福井工業大学あわら宇宙通信システムによるあけぼの (EXOS-D) 衛星データの受信と宇宙空間プラズマ波動の解析研究

武村 輝\* 大家 寛\*\* 中城 智之\*\*\*

## Data acquisition of the Akebono (EXOS-D) satellite through the Space Communication System at Awara, Fukui University of Technology, and analysis study of the space plasma wave

Akira Takemura\*, Oya Hiroshi\*\*, Tomoyuki Nakajo\*\*\*

At Awara space communication facility of Fukui University of technology, telemetry signals from the Akebono (EXOS-D) satellite have been received and the transmitted codes are recovered so as to be original observation data. The present research has been carried out to treat this acquisition processes mainly being focused on the PWS (Plasma Wave and Sounder) data. For achieving the data acquisition and archiving the data, to add the information of the satellite positions where the transmitted data are observed is the essential subject. The data analyses of the PWS data based on decided satellite positions have also been carried out. We are planning the future studies on AKR by utilizing achieved data acquisition system and obtained data together with data of lunar orbiting satellite, Kaguya.

Keywords: Awara, Akebono (EXOS-D), PWS, Plasma wave, AKR, Kaguya(SELENE)

### 1. 序論

あけぼの (EXOS-D) 衛星 (以後 EXOS-D と呼ぶ) は、オーロラの主因となるエネルギー粒子の加速過程の解明を行い、地球磁気圏と極域電離圏の結合を究明する事を主目的とし、また、地球内部磁気圏の構造やそのダイナミクスの解明を目指して 1989 年 2 月文部省宇宙科学研究所 (現 JAXA) によって打ち上げられ現在も健在で観測、運用されている。

この EXOS-D には宇宙空間のプラズマ波動を観測するため、プラズマ波動及びサウンダー観測装置 (PWS : Plasma Wave and Sounder) が搭載され宇宙空間プラズマ波動の自然状態の観測と電波放射による能動的実験を行っており、過去 20 年間に渡り、多くの発見をもたらしている [1]。福井工業大学では、あわら校地に建設された宇宙通信受信システム用いて 2003 年から EXOS-D の電波を受信している。本論文では、独自に行ったあわら校地における取得データの解析システムの構築及び、その解析システムを用いたプラズマ波動の解析例について報告する。すなわち、

---

\* 電気工学専攻大学院生    \*\* 福井工業大学名誉教授    \*\*\* 宇宙情報科学科

- 1) あわら宇宙通信システムで取得された PWS データを用いた、あわら観測局として他の研究機関のシステムに依存しない独自のデータ解析システムの構築
  - 2) 2007年9月14日に種子島宇宙センターから打ち上げられた月探査機かぐや (SELENE) と EXOS-D 衛星によるオーロラキロメータ電波 (Auroral Kilometric Radiation ; AKR) の同時観測データの対比検討による、AKR の放射特性についての検討
- の2項目について報告する。

## 2. あわらキャンパス独自のデータ解析システム構築の必要性

EXOS-D 衛星は軌道面傾斜角 75 度の極軌道衛星で、近地点高度 300km、遠地点高度 1 万 2000km の地球近傍の宇宙空間を周回している。宇宙空間プラズマとオーロラ粒子加速域の解明を目指し、その観測装置の一つに PWS がある。PWS 観測の自然プラズマ波動観測モードでは、衛星周辺のプラズマ波動及び遠方から伝播する電磁波を 20kHz~5MHz にわたる高周波域で観測する [2]。

この PWS 観測データを福井工業大学では、あわら宇宙電波受信システム (図 1) により取得可能としている。10m パラボラアンテナにより受信された EXOS-D 衛星のテレメトリ信号 (搬送周波数 2280.5MHz) は、給電部にてフィルタ、増幅器を通過した後、同軸ケーブルで観測室内の S バンドレシーバに送られ周波数 20MHz に周波数変換される。その後テレメトリ復調部にて元のデジタルデータに復調され、TLM モニタ部 PC の内蔵 HDD に保存される。データ取得のスケジュールは TLM 入力処理部 PC で管理され、約 2 時間に 1 回の割合で EXOS-D 衛星からのデータを受信している。この受信システムは 2003 年より稼働し、現在まで連続的にデータ取得を行っている [3]。

このようにデータ取得はこれまでに他の研究機関で構築されてきた受信システムとは独立して行われており、取得したデータおよびデータ解析法の有効性を実証するために、独自のデータ解析システムの構築を行った。

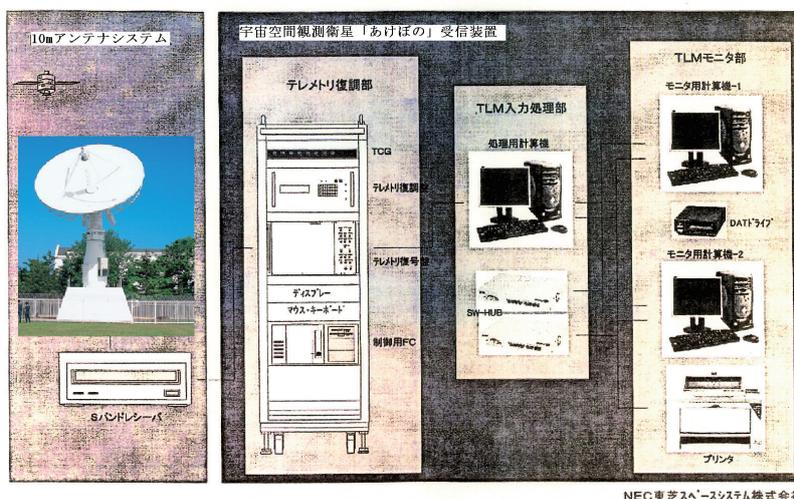


図 1 あわら宇宙電波受信システム

### 3. データ解析システムの構築－EXOS-D 衛星観測に対する衛星位置の決定－

データ解析において観測データが宇宙空間のどこで得られたかを正確に表すことは不可欠である。宇宙空間プラズマ現象が宇宙空間に延びる地球磁場の影響を受けるため、位置決定には、地球磁場をダイポールで近似した地磁気座標系が必要である。そのため、軌道6要素によるEXOS-D衛星の春分点赤道座標系で算出した位置を基礎に、本研究では地球偏心ダイポール磁気座標系への変換プログラムを開発し衛星位置決定を実施した。

#### 3.1. 地球ダイポール磁気座標系

地球ダイポール磁気座標系は双極軸方向の単位ベクトル  $\hat{z}_d$  を基準にダイポール磁気緯度を定め、磁気経度方向は地磁気地方時を太陽の南中時方向をもって決定している。

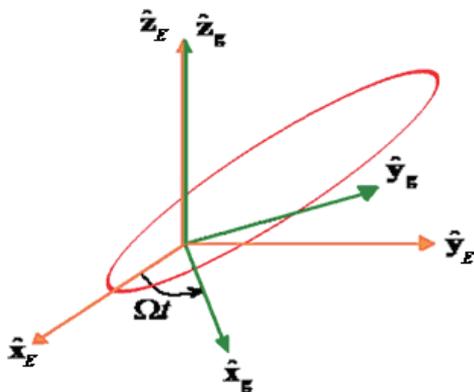


図2 春分点赤道座標系から  
グリニッジ地心座標系へ

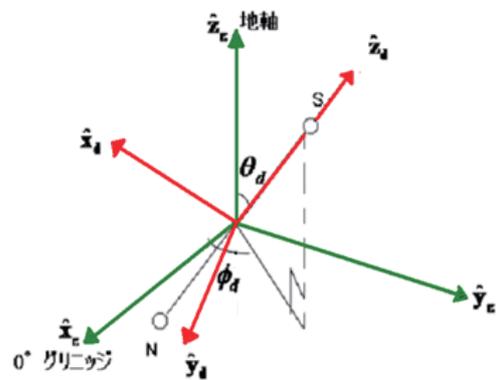


図3 グリニッジ地心座標系から  
ダイポール座標系へ

衛星位置は春分点赤道座標系  $(\hat{x}_E, \hat{y}_E, \hat{z}_E)$  で表わされているが、この春分点赤道座標系とグリニッジ地心座標系  $(\hat{x}_g, \hat{y}_g, \hat{z}_g)$  の関係を求め(図3参照)、さらにグリニッジ地心座標系と磁気ダイポール座標系との関係(図4参照)より、衛星位置をダイポール磁気座標系で求められ、次の(1)式のように求めることができる[4]。

$$\left. \begin{aligned} \hat{x}_d &= \cos \theta_d \cos \phi_d \cdot \hat{x}_E + \cos \theta_d \cdot \sin \phi_d \cdot \hat{y}_E - \sin \theta_d \cdot \hat{z}_E \\ \hat{z}_d &= \sin \theta_d \cdot \cos \phi_d \cdot \hat{x}_E + \sin \theta_d \cdot \sin \phi_d \cdot \hat{y}_E + \cos \theta_d \cdot \hat{z}_E \\ \hat{y}_d &= \hat{z}_d \times \hat{x}_d = -\sin \phi_d \cdot \hat{x}_E + \cos \phi_d \cdot \hat{y}_E \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

#### 3.2. 地球偏心ダイポール磁気座標系

磁場双極子の中心は、地心と一致していない。したがって本研究では、より現実に近い磁場として偏心ダイポールモデルを地磁気分布(理科年表)を考慮して導入した。すなわち実測値の水平分力から磁気赤道沿の磁場強度変化に一致する条件及び、実測されている全磁力から両極の磁場強度に一致する条件に適応するように地磁気双極子の位置を決定(図5参照)し、この偏心ダイポール磁場に対する座標系を求めた。

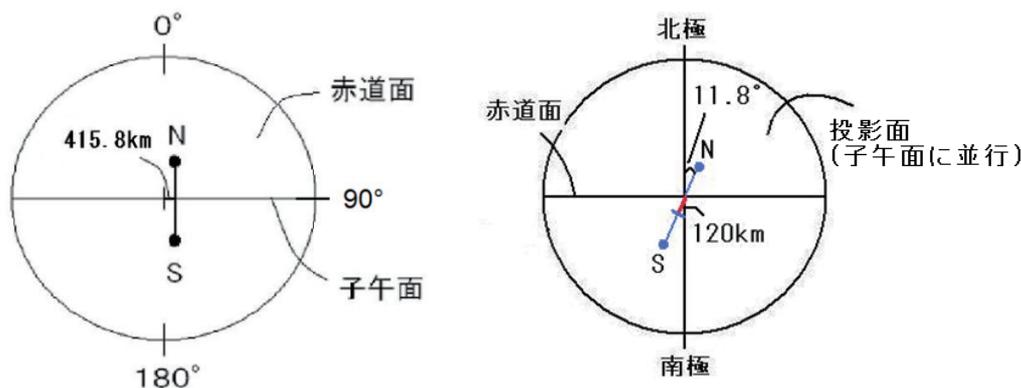


図4 偏心ダイポール磁気座標系を構成するダイポール中心のずれ。(左)赤道面投影および(右)子午面投影。

#### 4. 取得データおよびデータ解析システムの有効性

##### 4.1. EPWAT による地球ダイポール磁気座標系における衛星位置決定の検証

図5に開発した磁気座標系を用いて解析した PWS データのダイナミックスペクトル表示の1例を示す。周波数 380kHz から 1340kHz の間に見られる、常時観測され徐々に周波数が上昇する成分は UHR (Upper Hybrid Resonance; 高域ハイブリッド波) モードのプラズマ波動であるが、白い丸で示した領域の強度が強くなっている。このような波動は EPWAT (Equatorial enhancement of the Plasma Wave Turbulence; 赤道 UHR 波動急増現象) と呼ばれ、磁気緯度  $\pm 5^\circ$  以内に存在する現象であることが報告されている [5]。本研究で開発した磁気座標モデルでは磁気緯度が約  $\pm 5^\circ$  になっている。EPWAT 現象はあわら宇宙通信受信システムでは65例得られているが、全てにおいて地磁気緯度  $\pm 5^\circ$  以内に存在することが示され、取得したデータおよび開発した磁気座標系に基づくデータ解析システムの有効性が示された。

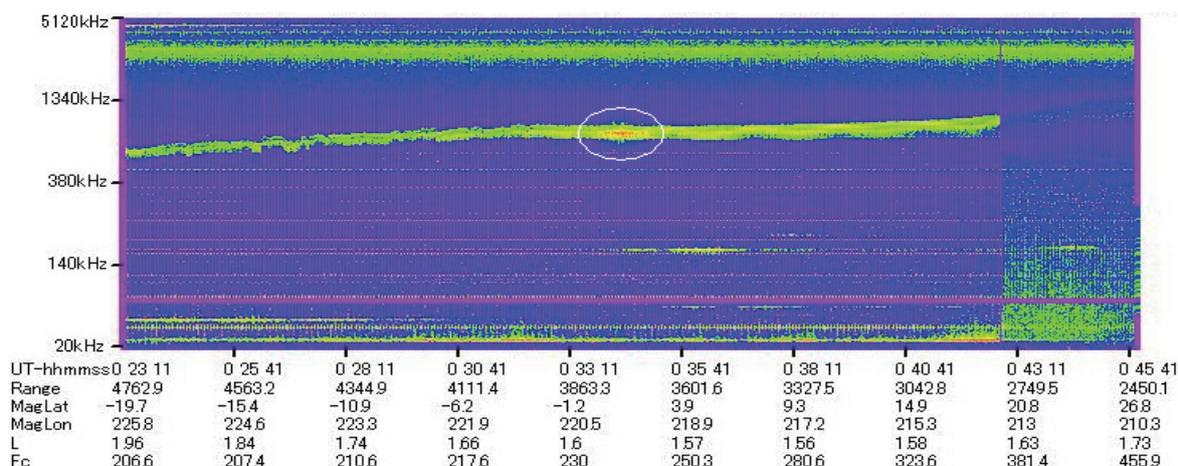


図5 本研究の結果得られた“EXOS-D 衛星”プラズマ波観測装置 PWS によるダイナミックスペクトル。縦軸に周波数、横軸に時間の経過に対応する衛星位置を示す。中央に見える曲線状のスペクトルは高域ハイブリッド波ブランチで丸印の部分は、EPWAT を示す。

4.2. サイクロトロン周波数との対比による検証

ダイポール磁気座標系における位置決定の検証の第2段として、観測されたプラズマ波動データ解析により求められた電子サイクロトロン周波数と、決定された衛星位置から求める電子サイクロトロン周波数との対比を行った。観測されたプラズマ波動データ解析に際しては、高域ハイブリッド波ブランチの上限を高域ハイブリッド周波数  $f_{UHR}$ 、下限をZモードカットオフ周波数  $f_Z$  として算出した。すなわち、プラズマ周波数  $f_P$ 、電子サイクロトロン周波数  $f_C$  に対して、

$$f_{UHR} = \sqrt{f_P^2 + f_C^2} \tag{2}$$

$$f_Z = \sqrt{f_P^2 + \left(\frac{f_C}{2}\right)^2} - \frac{f_C}{2} \tag{3}$$

となるが、(2)、(3)式より観測された  $f_{UHR}$  及び  $f_Z$  に対し  $f_C$  が求められる。この対比の結果は、図6に示すように、観測値と計算値の誤差が、最大でも±5%程度であり、プラズマ波動の物理的検討には全く問題がないレベルまでの精度が得られていることが実証された。

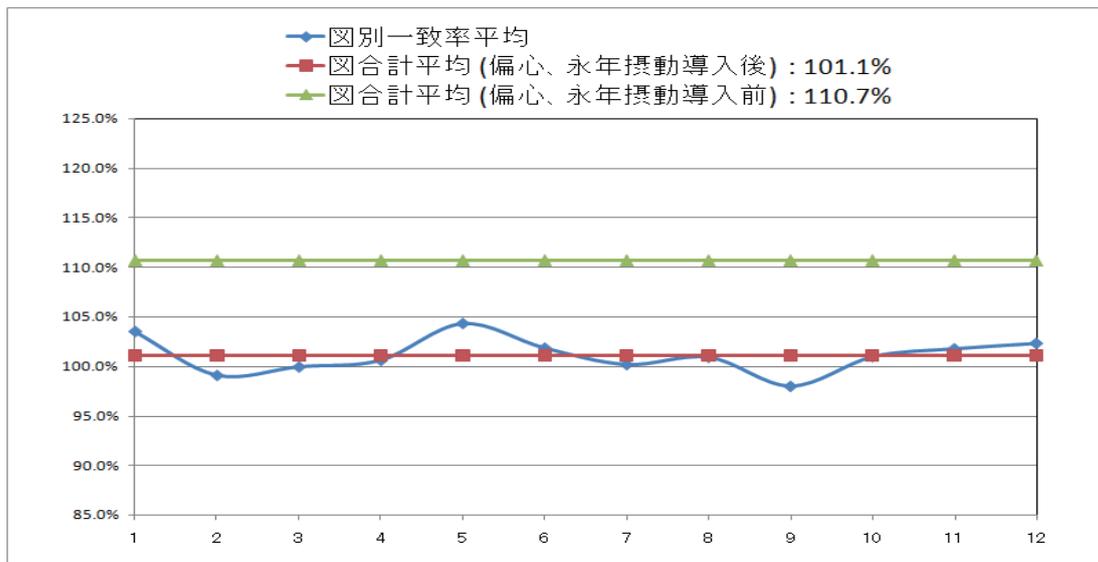


図6 観測と偏心ダイポールモデル計算の一致率

5. 月周回探査機 かぐや (SELENE) とあけぼの (EXOS-D) 衛星における

AKR (Auroral Kilometric Radiation) 同時観測

以上、取得したデータおよび開発したデータ取得システムの有効性が証明された上で、AKR のデータ解析を行った。AKR はオーロラの発光に伴って極域上空で放射される電波としてよく知られているが、その放射機構は未だ十分に解明されていない。残された課題の一つに電波の放射指向性の究明があり、放射機構理論決定の上で必要不可欠の要素である。この問題にアプローチす

るために、月周回探査機かぐやと EXOS-D 衛星が同時に行う地球オーロラキロメータ電波の同時観測データの対比を、2008 年 8 月 12 日、2008 年 8 月 19 日、及び 2008 年 9 月 10 日の三対に対して行った。

### 5. 1 2008 年 8 月 12 日の観測の場合

図 7 に 17 時 11 分 09 秒から 17 時 38 分 39 秒にわたって観測された EXOS-D 衛星とかぐやにおける観測データを示す。上段はかぐや、下段は EXOS-D のデータである。四角で示した領域で同時に AKR が観測されている。観測周波数を観測例から 4 点を選んで対比してみると表 1 のようになる。表 1 より、上限周波数は 20kHz~166kHz 程度であるが、下限周波数はあけぼのの弱い放射が 100kHz 前後までおりにているのが観測されるのに対し、かぐやでは強い成分が 220~290kHz で終わっている。これは、EXOS-D 衛星は電波源に近いので微弱な成分が検出されているためであり、注意深く見るとかぐやでもほぼ同じ下限の周波数を受信している。したがって、かぐやと EXOS-D で同一電波源を観測していると結論される。

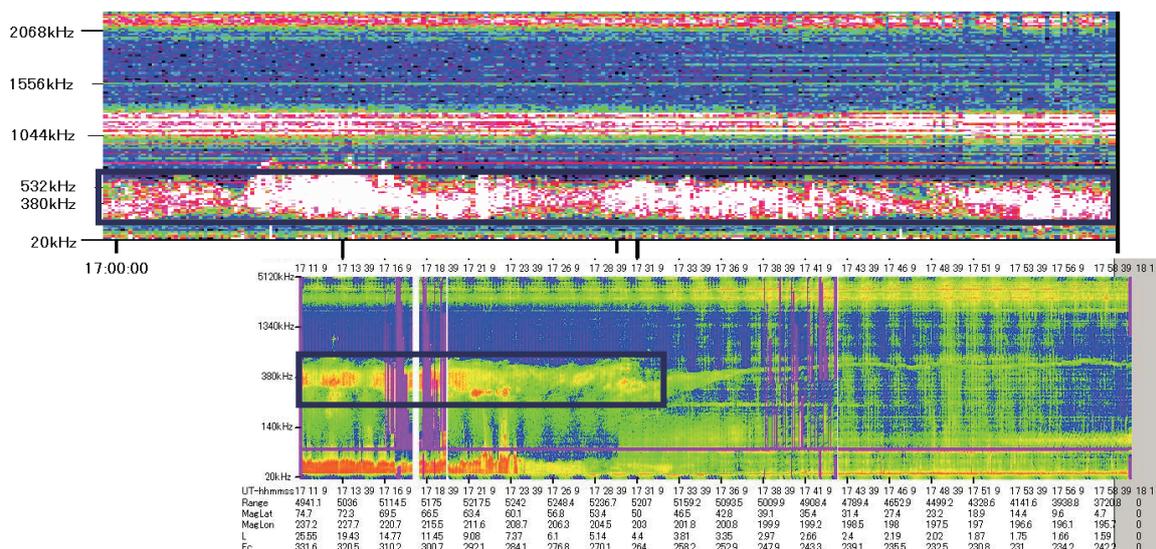
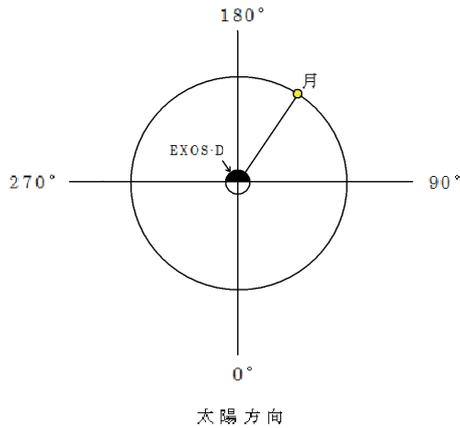


図 7 2008 年 8 月 12 日の観測例。上段はかぐやによって観測されたダイナミックスペクトル、下段は EXOS-D 衛星が極域を通過する時に本研究により観測されたダイナミックスペクトルである。

表 1. 8 月 12 日の AKR 上限及び下限周波数の例

上限周波数(kHz)	時刻	あけぼの	かぐや
	17:13:00	892	726
	17:21:30	700	601
	17:24:42	572	601
	17:27:54	636	560
下限周波数(kHz)	時刻	あけぼの	かぐや
	17:13:00	92	279(強) 103(弱)
	17:21:30	100	269(強) 103(弱)
	17:24:42	92	227(強) 103(弱)
	17:27:54	120	290(強) 123(弱)



しかし一方、それ以降の時間帯では、かぐやで継続して AKR が受信されているのに対して、EXOS-D では受信されていない。これは EXOS-D の磁気緯度が 50 度を下回りプラズマ圏に突入したためと考えられる。この場合のかぐやと EXOS-D の位置関係を図 8 に示す。AKR は少なくとも方位角方向に 90 度の広い範囲で放射されていると考えられる。

(左) 図 8 2008 年 8 月 12 日の観測に対する EXOS-D とかぐやの位置関係

5. 2 2008 年 8 月 19 日の観測の場合

2008 年 8 月 19 日には 13 時 18 分 02 秒から 13 時 50 分 48 秒までかぐやと EXOS-D の同時観測が実施された。図 9 にこの場合のダイナミックスペクトルを示す。四角で示した範囲が AKR であり、前半で同時に受信されている。この場合 EXOS-D の観測位置とかぐやの観測位置関係は図 10 に示すようになっており、方位角方向に広く放射されていることがわかる。

しかしこの場合、EXOS-D では AKR の観測が継続しているにもかかわらず、かぐやでは途中で観測されなくなっている。この問題に関して、表 2 に示すスペクトル周波数の上限と下限の例を見ると、上限周波数が大きく異なっている。すなわち、かぐやでは EXOS-D 衛星で観測している低い電波源位置が、図 11 に示すように地球のプラズマ圏に遮られて見えなくなっていると理解される。また図 12 の地磁気変化は、プラズマ圏の境界線のプラズマ密度の上昇を示唆する地磁気変動を示す。したがって、この効果とともに地球の回転により地磁気北極がさらに離れ、プラズマ圏の境界線が黄道面よりさらに高くなり、高度の高い電波源を持つ AKR も掩蔽を受け始めたことを強く示唆している。

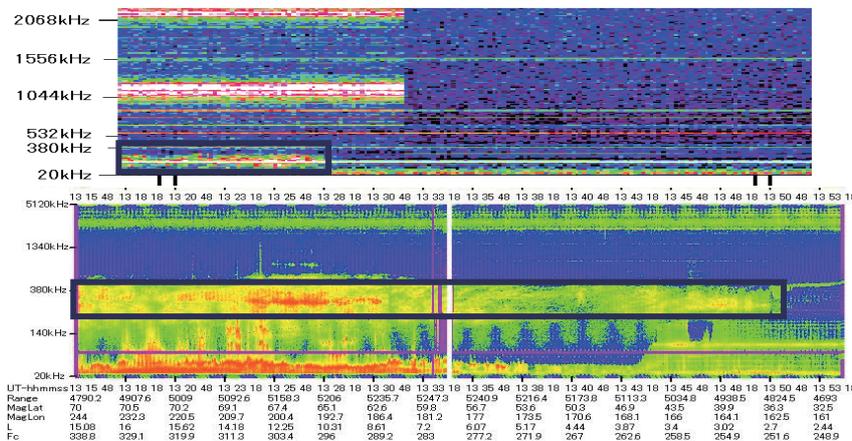


図 9 図 7 と同じ。ただし 2008 年 8 月 19 日の観測例。

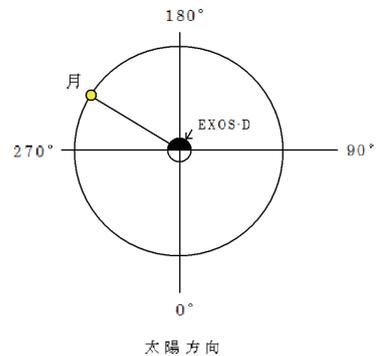


図 10 かぐやと EXOS-D の位置関係

表 2. 8 月 19 日の AKR 上限及び下限周波数の例

上限周波数(kHz)	時刻	あけぼの	かぐや
	13:20:10	572	269
	13:22:19	540	269
	13:23:58	508	331
13:26:22	540	310	
下限周波数(kHz)	時刻	あけぼの	かぐや
	13:20:10	100	144(強) 103(弱)
	13:22:19	68	103
	13:23:58	64	103
13:26:22	84	103	

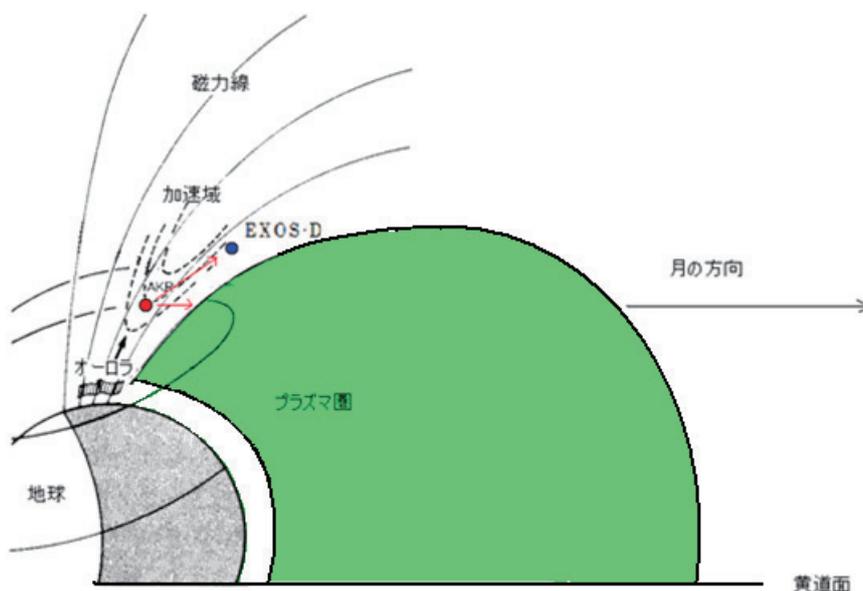


図 11 AKR 電波と月の方向の関係。かなり収縮したプラズマ圏でも位置関係により掩蔽が生ずる。

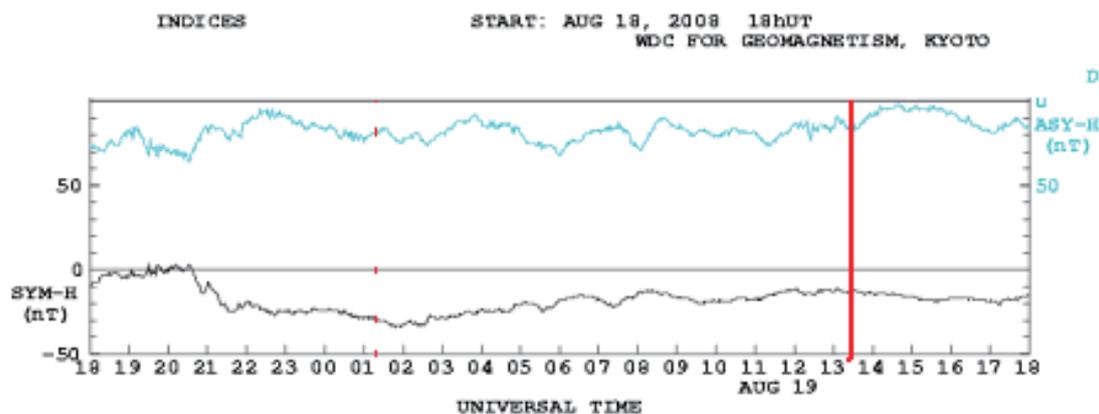


図 12 2008 年 8 月 19 日の地磁気 SYM-H (対称水平成分)、及び ASY-H (非対称水平成分)、赤線の前後にかぐや、あけぼのが AKR 観測を行っている。

5. 3 2008年9月10日の観測の場合

図13に2008年9月10日の観測例を示す。この場合、月齢10.7で、図14のようにEXOS-D衛星とかぐやの位置関係が反対方向に近い160°の開きがあるのに関わらず、観測されたスペクトルは表3に示すように、非常に良い一致を示していて、オーロラ・キロメートル電波放射は方位方向には非常に幅広く広がっている。この時期は図15に示すような地軸と地磁気ダイポール軸との位置関係からかぐやの位置に対するAKR電波源の掩蔽を避けていることが判明した。

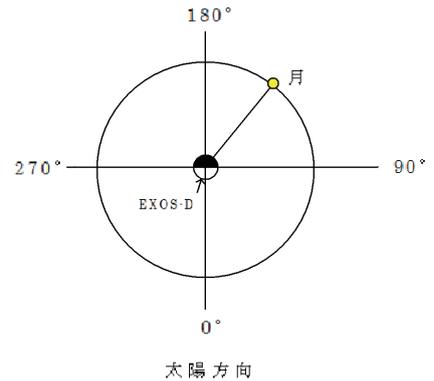
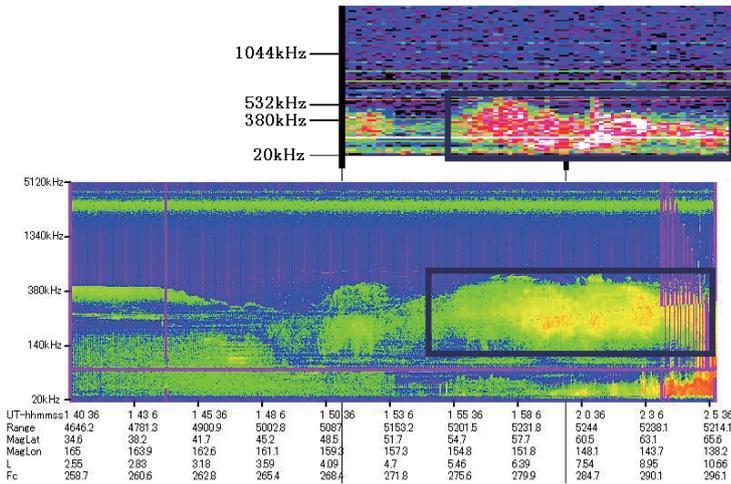


図14 2008年9月10日の観測におけるEXOS-D衛星とかぐやの位置関係

図13 図7と図9同じ。ただし2008

年9月10日の観測例。

表3 9月10日のAKR上限及び下限周波数の例

上限周波数(kHz)	時刻	あけぼの	かぐや
	2:00:17	700	435
	2:01:11	508	622
	2:02:14	444	477
	2:03:35	444	477
下限周波数(kHz)	時刻	あけぼの	かぐや
	2:00:17	100	62
	2:01:11	100	82
	2:02:14	104	103
	2:03:35	100	144(強) 123(弱)

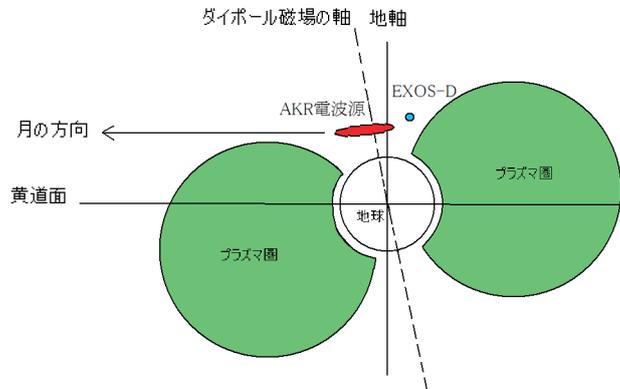


図15 かぐやに向かうAKRの方向 (AKRの電波は紙面からこちらに向かって放射されている。その電波をかぐやが受信している。)

## 6. 結論

あわら宇宙通信システムによって受信された EXOS-D 衛星データの解析を地球偏心ダイポールモデルを用いて行った結果、PWS データ特性と磁場モデルとの間に整合性が認められ、あわらキャンパスで取得したデータのおよび開発したデータ解析システムの有効性を確立する事ができた。この基礎に基づき EXOS-D とかぐやによる AKR の同時観測データを解析した結果、地球を包むプラズマ圏の存在によって同時観測が不可能となる場合があることが示されたが、AKR は方位角方向に非常に広い範囲で放射されていることが明らかとなった。今後、さらに解析例を増やし、AKR の放射指向性の詳細について検討する予定である。

## 参考文献

- [1] Oya H, A.Morioka, K.Kobayashi, M.Iijima, T.One, H.Miyaoka, T.Okada and T.Obara, Plasma Wave Observation and Sounder Experiments (PWS) Using The Akebono (EXOS-D) satellite – Instrumentation and Initial Results Including Discovery of the High Altitude Equatorial Plasma Turbulence, 1989.
- [2] 大家寛, 森岡昭, 小野高幸, 宮岡宏, 小原隆博, 高周波域プラズマ波動及びサウンダー観測 (PWS), 昭和 63 年度第 2 次飛翔実験科学衛星 EXOS-D, 1988.
- [3] 青山隆司, 加藤芳信, 中城智之, 宇宙通信工学実験実習, 2004.
- [4] 武村輝, 福井工業大学あわら宇宙電波受信システムによるあけぼの(EXOS-D)衛星データの受信と宇宙空間プラズマ波動の解析研究, 福井工業大学修士論文, 2007.
- [5] Oya H., M. Iizima, A. Morioka, Plasma turbulence disc circulating the equatorial region of the plasmasphere identified by the plasma wave detector (PWS) onboard the Akebono (EXOS-D) satellite, Geophysical Research Letters, vol. 18, 329-332, 1991.

(平成 22 年 3 月 31 日受理)