

# あけぼの衛星アナログ広帯域受信器による観測データの自動較正法

笠原 禎也\*1, 後藤 由貴\*1, 大池 悠太\*1

## Abstract

Akebono was launched in February, 1989 and has attained the 25 years of successful operation without major troubles. The VLF instrument onboard Akebono measures plasma waves below 20 kHz and plays an important role to study plasma physics in the Earth's magnetosphere. The VLF measures not only wave spectrum in digital format but also analogue waveform, and the analogue waveform data are transmitted via analogue telemetry. Huge amount of analogue data have been stored, but data analyses are not comprehensively performed so far because of the difficulties of their peculiar characteristics. In the present paper, we introduce current status of data analysis system developed for the VLF analogue waveform data. We also address anticipated outcomes from these huge datasets.

## 概要

あけぼの衛星は1989年2月に打ち上げられ、25年を超えた現在も定常運用を継続している。同衛星に搭載されたVLF波動観測装置は20kHz以下のプラズマ波動の電磁界観測を担当し、その長期観測データは磁気圏物理の解明に重要な役割を果たしている。同装置は、デジタルデータとしての波動スペクトルの計測だけでなく、アナログテレメトリによるVLF波形観測も行っているが、膨大に蓄積されたアナログ波形データは取り扱いの困難さから、これまで網羅的な解析が困難であった。しかし近年の情報処理技術の発展にともない、データのデジタル化や蓄積、観測データの自動較正が可能となり、これらの大容量データを用いて新たな知見が得られることが期待されている。本論文では、アナログ波形データの解析システムに用いられている情報処理技術の現状を報告するとともに、これまでに蓄積された大容量波動観測データの解析により期待される新しいサイエンスについて述べる。

## 1. はじめに

あけぼの衛星はオーロラを光らせるプラズマの加速メカニズムの解明を目的に、プラズマ加速機構に関わるプラズマ粒子や電場・磁場の精密観測をめざして、1989年2月に打ち上げられた。初期軌道条件は遠地点高度約10,000km、近地点高度約300km、軌道傾斜角約75度である。同衛星には、直流電場・磁場計測装置、プラズマ粒子計測装置、オーロラ撮像カメラのほか、プラズマ波動観測装置を搭載し、そのユニークな軌道の特性を活かして、当初の目的である極域観測のみならず、放射線帯やプラズマ圏などの中・低緯度域においても貴重なデータ取得を実現し、打ち上げから25年を経た現在も放射線モニタやプラズマ波動観測などの測器による継続観測が行われている。

プラズマ波動観測装置は、20kHz以下のELF/VLF帯の電磁界成分を計測するVLF装置と、20kHz以上の高周波帯の電磁波計測とサウンダー観測を行うPWS装置に分けられる。VLF装置のサブシステムの一つである広帯域スペクトル受信器(WBA; Wide Band Analyzer)は、14kHz以下の電界または磁界のアナログ波形データを取得し、そのデータはアナログテレメトリで地上に送られる。WBAデータは、地球磁気圏で観測される多種多様なVLF波動の詳細解析に大変有用であるが、アナログデータ特有の取り扱いの困難さゆえに、すべてのデータを網羅的に解析できないという問題があった。しかし、近年の計算機環境や情報処理技術の飛躍的進歩により、データのデジタル化や較正処理の定型化が進み、ようやくこれまで蓄積された大容量データの網羅的な解析にめどが立ちつつある。本論文では、WBAデータの解析システムの現況を紹介するとともに、データアクセス・解析環境の整備によって今後期待される科学成果について述べる。

\*1 金沢大学大学院自然科学研究科 (Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University)

## 2. あけぼの広帯域スペクトル受信器 (WBA) によるデータ取得

### 2.1 VLF 観測装置

あけぼの衛星に搭載された VLF 観測器<sup>2,3)</sup>のブロック図を図 1 に示す。VLF 観測器は 20kHz 以下のプラズマ波動の電磁界成分について、電界はスピン面内に伸展した片側 30m の直交ワイヤアンテナによるスピン面内の直交 2 成分、磁界は 800Hz 以上をループアンテナ、800Hz 以下をサーチコイルによって直交 3 成分の測定が可能である。VLF 観測器の受信部は 5 つのサブシステムに分かれており、本論文で紹介する WBA の他に、アンテナインピーダンス校正用の VIP (Vector Impedance Probe)、100Hz 以下の超低周波帯の観測を担当する ELF (Extra Low Frequency Range Analyzers)、波動の伝搬方向推定を目的とする PFX (Wave Normal and Poynting Flux Analyzers)、20kHz 以下の電磁界スペクトルを測定する MCA (Multi-Channel Analyzers) から構成される。

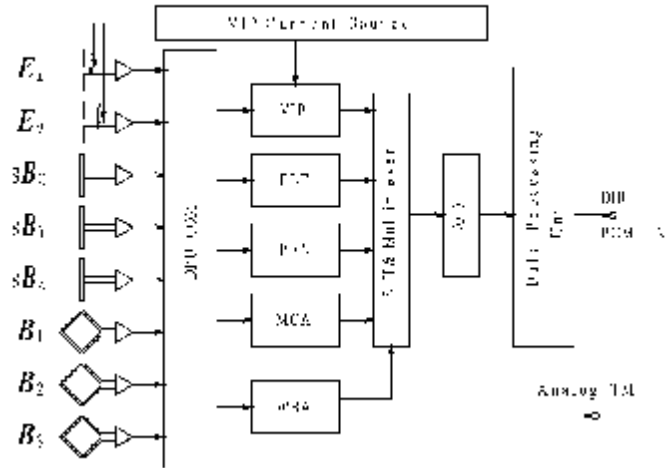


図 1 あけぼの VLF 観測装置ブロック図

WBA 以外の 4 つのサブシステムは、図 1 に示されるように機上でデジタル化され、デジタルテレメトリとして地上局に伝送される。これに対し、WBA は取得データをアナログテレメトリとして地上伝送する。そのため、上述した MCA と WBA はカバーする周波数帯域がほぼ同じにもかかわらず、データの特性や用途が大きく異なる。

すなわち、MCA が電界・磁界各 1 成分のダイナミックスペクトルを、対数的に等間隔に分割した 16 チャンネルのフィルタバンク (バンドパスフィルター) を用いて、ノミナル観測モード時は時間分解能 0.5 秒で測定するのにに対し、WBA は電界または磁界のどちらか 1 成分しか測定できない代わりに、アナログの波形データを取得するため、任意の時間・周波数分解能で解析が可能である。その反面、WBA はシステム上の特性上、データの校正や可視化に多数の処理過程を要するため、データ解析に大変手間がかかるという問題がある。

### 2.2 WBA 装置の特徴

WBA はアナログ計測器であるため、データ処理を行う際に、他のデジタル機器と異なる様々な点に留意しつつ解析を行う必要がある。以下に WBA データの特徴をまとめる。

#### 1. 観測波形の VSB 変調

WBA は電界または磁界センサいずれか 1 成分で測定した 14kHz 以下の波形信号に対し、20kHz のサブキャリアを用いて振幅変調 (AM) の一種である VSB 変調した信号が送られてくる。元の観測データのスペクトルと、VSB 変調後のスペクトルの関係は図 2 に示すとおりである。VSB 変調は、振幅変調したスペクトルの片側の側波帯に加え、残る反対側の側波帯の一部までを含めた帯域を伝送する通信方式で、WBA では下側波帯のすべてと上側波帯の一部を地上局に伝送している。送

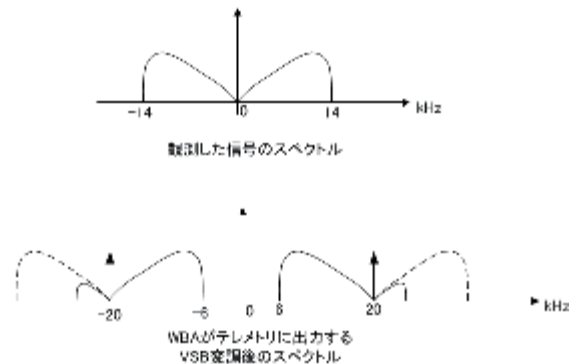


図 2 VSB 変調のイメージ図

信されたデータは VSB 変調がかかったまま地上局で記録されるため、受信信号は 20kHz を起点に周波数が上下逆転した状態で記録・蓄積される。そのため、実際に観測された波動のスペクトルを得るには、変調がかかったままの信号に FFT をかけ、20kHz 以下の周波数スペクトルを上下反転させる必要がある。一方、元の波形を復調するには、一般に VSB 変調波の復調に用いられる 20kHz のローカル信号を用いた同期検波を行う必要がある。

## 2. データの記録形態

WBA が生成するアナログ信号 (VSB 変調された信号) は、可聴域の周波数帯であることから、打ち上げ当初は地上局に設置した市販の DAT (Digital Audio Tape) デッキを用いて「音声信号として」磁気テープである DAT に録音後、宇宙研を介して我々の研究グループのもとに郵送されていた。DAT に記録された WBA データの数は、約 28,400 パスに上る。解析を行うには、まず、テープを 1 本ずつ DAT デッキで再生する必要があるが、市販のオーディオデッキによる音声再生のため、早送り再生などは不可能である。そのため、全データの再生には観測総時間と同じだけかかる。

## 3. 時刻情報のデコード

WBA データには、地上局で時刻情報としてアナログのタイムコードが付与される。具体的には、DAT に記録できる音声データがステレオに対応していることから、右チャンネルに VSB 変調がかかったままの WBA の観測信号を入力し、左チャンネルにタイムコードを入力することでステレオ音声として記録する。使用されるタイムコードは、IRIG-A, IRIG-B, NASA コードなど追跡局やデータ取得時期によって 3 種類のタイムコードが混在しており、テープを再生する際にタイムコードの種類を判別してデコードを行う必要がある。

## 4. WBA 観測状態との照合

WBA による実観測データは上述の通りアナログテレメトリとして送られてくるが、WBA の機器情報、いわゆる House Keeping データ (以下、HK データ) は、他の観測器と同様、デジタルテレメトリとして送られており、宇宙研の SIRIUS に登録される。WBA の HK データとしては、WBA の ON/OFF 情報のほか、使用センサの種類 (電界 or 磁界) とセンサ軸方向 (Ex, Ey など)、受信器のゲインなどがある。WBA は後に述べる WIDA というチップを用いたオートゲインコントロール (AGC) を行っており、ゲイン情報はデータ較正のために大変重要な HK データである。

### 2.3 取得した WBA データの記録形態

DAT に記録された音声データは、このまま磁気テープ媒体で保管すると、テープの劣化により貴重なデータが失われる恐れがあることや、どのテープ (どのパス) にどのような波動現象が記録されているかを調べるには、逐一、テープを再生しなければ確認できない。しかし、打ち上げ当初はテープを再生し、デジタル化したデータをそのまま電子ファイルとして保管するには容量が大きすぎ、デジタルデータをそのまま保管することはほとんど不可能であった。そのため、当初のデータ解析は MCA など興味ある波動データが観測された日時を選び出し、該当時刻の WBA データを再生して詳細解析を行う方法が主流であった。

しかしこの問題は、近年のパソコンや周辺機器性能の進歩に伴い、劇的に改善された。まず我々は、追跡局でデータ記録に用いていた DAT デッキを、サウンドカードを組み込んだ汎用デスクトップパソコンに置き換え、データをその場で A/D 変換して wav フォーマットの音声ファイルに変換して記録するデータ記録方式に変更した。サウンドカードで取り込んだ音声を、デジタル音声化する部分はパブリックドメインで公開されている一般的な音声記録ソフトウェアを使用している。これにより、内之浦局では 2006 年以降、スウェーデン・エスレンジ局では 2009 年以降の WBA データが、追跡局で直接デジタル化されるようになった。デジタル化されたデータは内之浦局では DVD に記録され郵送で、またエスレンジ局のデータはネットワーク経由で取得可能となった。

一方で、上記の装置にリプレースが行われる以前に DAT に録音し、当研究グループで保管していたデータは、テープ総数が 20,000 本を超えるため、DAT を 1 本ずつ DAT デッキにかけては、たとえ 24 時間休まず再生を続けても、全データのデジタル化には少なくとも 5 年超の時間を要してしまう。この問題に対し我々は、複数チャンネルの音声を独立に取り込むことが可能なオーディオインターフェースカード<sup>4)</sup>に DAT デッキの出力を並列で接続することで、DAT を再生した音声を同時に A/D 変換して wav 形式の音声ファイルを計算機に取り込むシステムを構築した。このシステムが完成したことにより、現在は学生アルバイトの形で日常的に DAT の再生を行い、wav ファイル化した波形データをハードディスクに蓄積する作業が進んでいる。現在は、使用可能な DAT デッキの台数の制約から 4 台のデッキを併用して、これまでに約 7 割弱のテープ再生が完了している。全テープの再生が完了するまでに、あと 1 年余り要する見込みである。

なお、wav 形式に変換後の音声データは、サンプリング周波数が 48kHz、1 サンプルあたり 16bit、ステレオ形式で記録される。すなわち生成されるデータ容量は、



$$16\text{bit/sample/ch} \times 48,000 \text{ sample} \times 2\text{ch} = 1,536,000\text{bps} \quad (1)$$

であり、1時間分の観測データが691.2MByteに相当する。これまでの観測データをすべてデジタル化すると、約30TByte超になると予想される。現在これらの音声データは、当研究グループが保有するRaid HDD上に、追跡局名とパス番号を付与したファイル名で蓄積され、ネットワーク上に接続された計算機から利用可能となった。しかしこれらは先に述べた通り、VSB変調されたままの波形データとタイムコードをそのまま記録しただけの形式であり、実際のデータ解析を行うには、時刻データのデコードや強度補正などの処理を行う必要がある。これらの方法について次章で詳しく述べる。

### 3. WBA データ較正処理

#### 3.1 WBA ステータス参照システム

WBAには十分なダイナミックレンジ確保のために、ON/OFFが切り替わるICチップ増幅器(WIDA: Wide Dynamic Range Amplifier)が組み込まれており、受信器のゲインを自動調整する機能(オートゲインコントロール; AGC)を有する。WBAに実装されたWIDAは1個あたり15dBのゲイン<sup>†1</sup>のON/OFFが切り替えでき、合計3個のWIDAにより、受信器のゲインが0dB~45dBの間で変更可能である。WIDAは0.5s毎に直前に得られたプラズマ波動の強度を参照して、最適な値に切り替えられる。2.2節で述べたように、このON/OFF情報は、WBAのアナログ波形(アナログテレメトリ)とは別に、WIDAがゲインONしている数として0~3の値としてHKデータに出力され、デジタルテレメトリで地上に伝送されている。

WBAで計測した信号の強度を求めるには、このWIDA情報が必須である。そこで我々は、デジタルテレメトリから、WBAのWIDAに関するHKデータを抜き出し、PostgreSQLを用いてデータベースを構築した。同データベースに対し、時刻情報をキーに問合せを行い、該当時刻のWIDA情報を得るアプリケーション組み込み型の関数を用意することで、WBAデータからデコードした時刻をもとに、その時刻のゲイン情報が得られるようになった。処理の概念図を図3に示す。

#### 3.3 強度較正アルゴリズム

図3に示す処理システムを構築することにより、観測データのゲイン情報が機械的に参照できるようになった。しかし、WBAデータに記録されている時刻は、地上局で付与されたタイムコードであり、デジタルテレメトリを宇宙研のSIRIUSに登録する際に付与される時刻情報とは、衛星内部や局内遅延、さらにはテレメトリの伝送遅延など様々な要素がからんで完全には一致しない。また、HKデータの時間分解能は0.5秒であるため、これより細かい時刻精度で、実際にWIDAがゲインを切り替えた時刻を特定できない。このため、上述のWIDAステータスのデータベースを参照してWBAデータの強度補正を行っても、ゲインの切り替え部分にわずかなギャップが生じる。この問題を解決し、WIDAのゲインが切り替わってもスペクトルデータをスムーズにつなぐための強度補正アルゴリズムを考案した。以下にその詳細を示す。

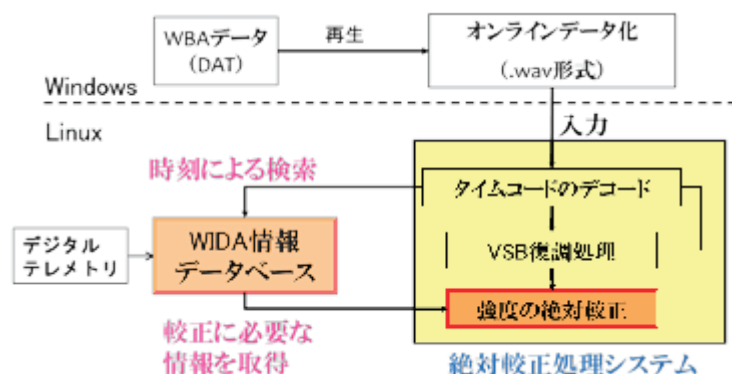


図3 WBA データ解析手順のブロック図

<sup>†1</sup> WIDAの本来のゲイン設計は25dBで<sup>3)</sup>、PFXなど他のサブ機器は実測上もそうなっているが、WBA内蔵のWIDAだけは打ち上げ後の統計的なデータ評価により15dBが妥当とされ、較正処理では15dBを採用している。

図4は1997年6月21日にスウェーデン・エスレンジ局で取得されたWBAデータのスペクトルである。ここでは、タイムコードをデコードした後、20:16:17~20:16:27UTまでの10秒間の波形データに対してFFTを施して描画したスペクトルの例を示している。FFTは960点で行っており、時間分解能20ms、周波数分解能50Hzを実現している。この段階では、WIDA情報に基づく強度補正は行っていないことに注意いただきたい。

図では、20:16:20UT過ぎにスペクトルの強度がいったん増加し、再び20:16:24UT過ぎに元のレベルに戻る様子が見られる。これは、真ん中(20:16:17~20:16:27UT付近)の時間帯は、前後の時間帯に対して受信機のゲインが15dB高くなっており、相対的にこの時間帯のみ強度が大きく記録されていたためである。

次に、WIDA情報のデータベースに記録された時刻情報をもとに、強度補正を行った結果を図5に示す。図より、WIDAの動作数が増加した部分が補正され、全体的に等レベルのスペクトルが得られているが、矢印を施した2か所において、強度の不連続部分が見られる。これは、先に述べたように地上局においてWBAデータに付与されたタイムコードと、SIRIUSに登録されたデジタルテレメトリの時刻情報にわずかなずれが存在する(HKデータに付与された時刻情報のほうが相対的に早い)ため、左側の矢印部では誤って強度が15dB小さく補正され、逆に右側の矢印部は補正が行われずに15dB高いままのスペクトルが残ってしまったためである。

そこで、このわずかな時刻のずれを補正し、正しく強度補正を行うための自動判定アルゴリズムを、新たに導入した。以下に手順を示す。

1. WIDAの動作数が増加した時刻を中心に、前後0.5秒間(計1秒間)のデータについて、FFTを行った時間幅(20ms)単位で、100Hz~10kHzの周波数帯域における平均強度を求める。強度変化の時間分解能は20msである。
2. 時間方向に、前後2点ずつの5近傍(100ms相当)のデータを使って、平均強度データにメディアンフィルタをほどこす。
3. メディアンフィルタを通したあとの強度変化の時系列データに対し、閾値以上の強度変化が見られる時刻を、WIDAの動作数が増加した時刻と同定する。現行システムでは、閾値をWIDAのゲインである15dBの半分の7.5dBに設定して判定しており、これで良好な特性が得られている。

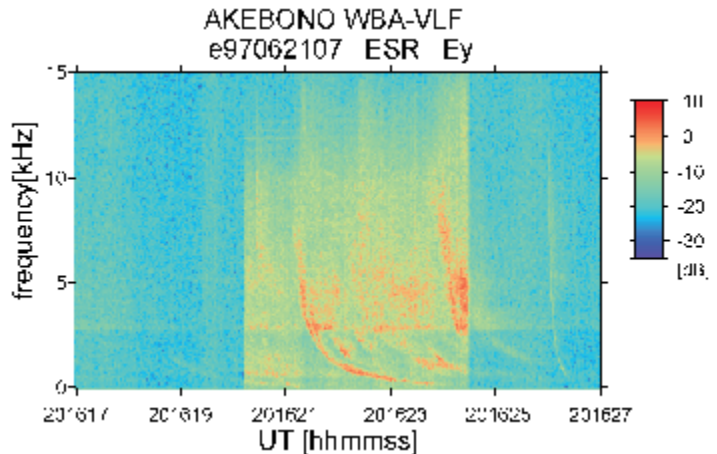


図4 強度補正前のWBAスペクトルの例

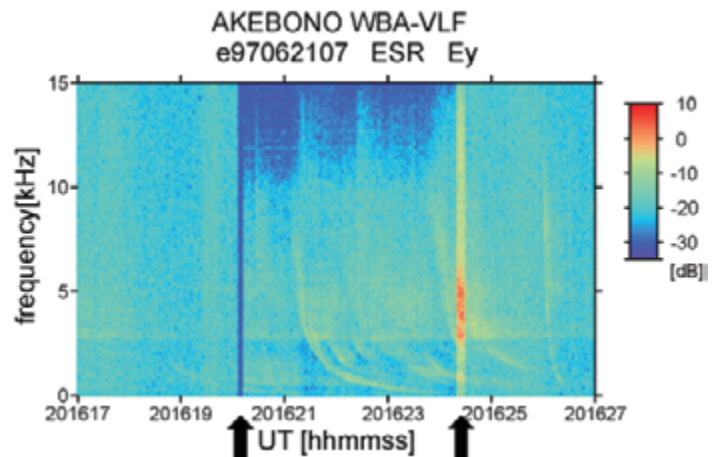


図5 WIDA動作情報に基づく強度補正後のスペクトル(時刻補正を行う前)

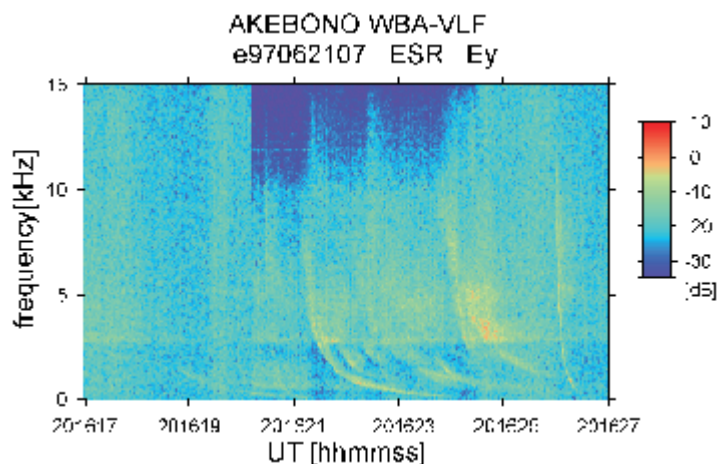


図6 時刻補正後のスペクトル

このような処理を行って、精密な WIDA 動作数の切り替わり時刻を決定し、スペクトル強度を補正した結果を図 6 に示す。図より、WIDA の動作数がいったん増加し、再び減少したいずれの時刻においても、時間方向にスペクトルがスムーズに接続されている。なお、真ん中の 20:16:17~20:16:27UT 付近の時間帯で、10kHz より高い周波数帯の強度が若干小さくなっているが、これは WBA 受信器本来の LPF の特性である。それに対し、前後の時間帯は WIDA による増幅率が小さいために、WBA からの出力信号のレベルが小さく、後段で重畳した雑音により LPF 特性が見られなくなったためと考えられる。

同アルゴリズムの適用により、WBA データを周波数領域に変換したデータについて、強度補正処理の自動化が実現し、大量に蓄積された WBA データの可視化と網羅的な周波数解析が可能となった。

#### 4. WBA データを利用したデータ解析の今後の展望と課題

##### 4.1 スペクトルデータを用いた雷ホイスラの解析

雷起源ホイスラは、雷放電を源として発生する VLF 帯のインパルシ的な電磁波が、電離層を突き抜けて宇宙プラズマ中を伝搬する波動現象である。あけぼの衛星では、この雷起源ホイスラが頻繁に受信されている。あけぼの衛星で WBA が受信した雷起源ホイスラの一例を図 7 に示す。

地球の磁気圏プラズマ中を伝搬する 20kHz 以下の電磁波は、プラズマの異方性の影響で、ホイスラモードと呼ばれる波として、地球の磁力線に沿うように屈折しながら伝搬し、その伝搬速度は高周波より低周波のほうが遅いという特性がある<sup>5)</sup>。その結果、観測点には高周波の波ほど先に到達し、遅れて低周波の波が到達することから、図 7 に示されるように、スペクトログラム上で「ノ」の字を左右反転させた形状となる。

ホイスラ波は伝搬時間  $t$  が周波数  $f$  の平方根に反比例する特性を持ち、雷起源ホイスラは、伝搬時間と周波数が次式で表せることが知られている。

$$t = \frac{D}{\sqrt{f}} \quad (2)$$

ここで変数  $D$  は雷起源ホイスラの伝搬遅延の度合いを表すパラメータであり、「分散」と呼ばれる。雷起源ホイスラの伝搬特性から、分散  $D$  は波源からの伝搬距離が長くなるほど大きくなる。また伝搬通路の電子密度が大きいほど、分散  $D$  が大きくなることも理論的によく知られている。

あけぼの衛星は軌道傾斜角 75 度で、南北半球を横切るような形で飛行するが、1 周回軌道の間に雷起源ホイスラが連続的に観測される事例が多数見られる。式(2)で示されるように、WBA で取得したスペクトルを、縦軸を周波数  $f$  の平方根の逆数に置き換えて描画し直すと、雷起源ホイスラは直線で表され、分散  $D$  は直線の傾きの逆数として求めることができる。

例として、1991 年 8 月 1 日に WBA で連続観測された雷起源ホイスラの分散  $D$  の時間変化の様子を図 8 に示す。同図は衛星軌道に沿った、雷起源ホイスラの分散  $D$  の時間変化である。また図 9 に、同時間帯におけるあけぼの衛星の軌道を、磁気子午面内に投影したグラフと、縦軸に磁気緯度、横軸に磁気ローカルタイムを取ったグラフの 2 種類で示す。この時、あけぼの衛星は北半球から南半球に向かって飛行しており、この間に雷起源ホイスラの分散  $D$  は  $50\text{s}^{1/2}$  から  $20\text{s}^{1/2}$  まで徐々に減少している。すなわちこのイベントでは、あけぼの衛星は波源に近づく方向に飛行しており、南半球に波源を持つ雷起源ホイスラが衛星軌道に沿って連続観測されたことがわかる。

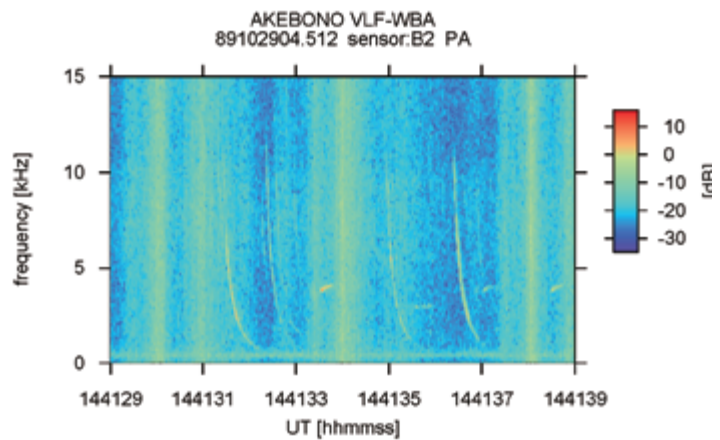


図 7 あけぼの衛星 WBA で観測された雷起源ホイスラのスペクトル



最後に、このような雷起源ホイストラの分散値解析の活用法について述べる。先に述べた通り、雷起源ホイストラの分散値  $D$  は、伝搬通路長だけでなく伝搬通路に沿った電子密度にも依存するため、たとえ波源から観測点までの距離が同じでも、波の伝搬遅延時間は一定とは限らない。ホイストラモードの波の伝搬通路や伝搬時間は、レイトレイシング<sup>6,7</sup>という方法を用いることで理論的に計算可能である。すなわち、地球磁気圏の電子密度プロファイルを変化させて、ホイストラ波のレイトレイシングを行い、衛星軌道に沿って実観測された分散値  $D$  のトレンド合致する電子密度プロファイルが得られれば、時々刻々と変化する地球磁気圏内のグローバルな電子密度プロファイルが、1 周回軌道毎に求められることになる。

このような解析法は一般に「逆問題」と呼ばれ、我々のグループではすでに、船舶航行用ナビゲーションの目的で地上局から送信されていた VLF 帯のオメガ信号をあげぼの衛星軌道上で受信し、その伝搬特性をレイトレイシングで再現することで、磁気圏内の電子密度プロファイルを求めることに成功している<sup>8</sup>。オメガ信号は GPS の発展により 1997 年 9 月に停波されたため、それ以後のデータに対して同解析手法を適用することは不可能となったが、それに代わるグローバルセンシング法として、25 年超にわたる WBA による雷起源ホイストラ解析は、非常に有用と考えられる。現在、我々は雷起源ホイストラデータを用いた逆問題解法の検討を、理論<sup>9</sup>と実観測<sup>10</sup>の両方から進めており、近い将来、具体的なイベント解析につなげていきたいと考えている。

#### 4.2 今後の課題

WBA アナログ波形データのデジタル化後のデータ蓄積処理が進み、同時に周波数領域での強度較正がシステムティックに行えるようになったことで、時間・周波数分解能に優れた WBA データを用いた雷起源ホイストラなどの解析とその応用にめどが立ちつつあるが、WBA データが十分利活用できるようになるには、まだ様々な課題が残されている。

まず、本論文で紹介した強度補正アルゴリズムは、FFT を施した後のスペクトルデータに対して有効であるが、波形データに対する補正法はまだ確立していない。ある特定の時間帯に特化して、ゲインが変化した時刻を FFT の結果から同定して、波形レベルで強度補正することは原理的に可能ではあるが、1 時間以上にわたって連続的に記録されている VSB 変調がかかった音声データを復調する傍らで、WIDA のゲインが切り替わった時刻を同定し、

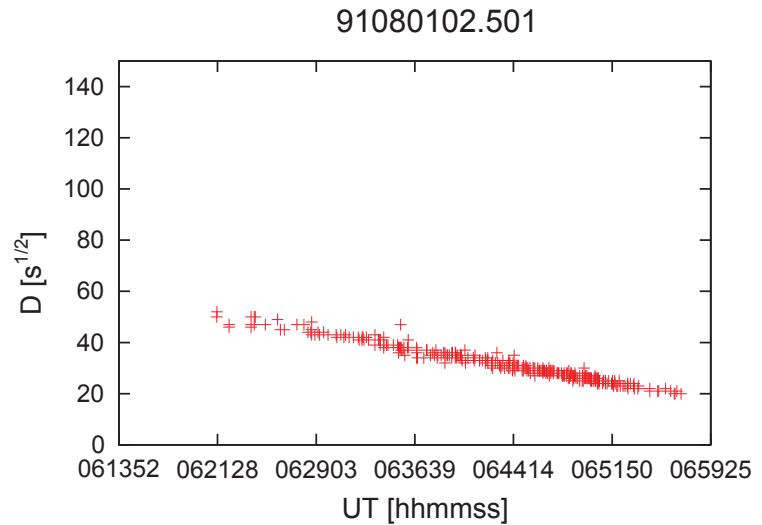


図8 1991年8月1日にWBAで観測された雷起源ホイストラの分散  $D$  の時間変化

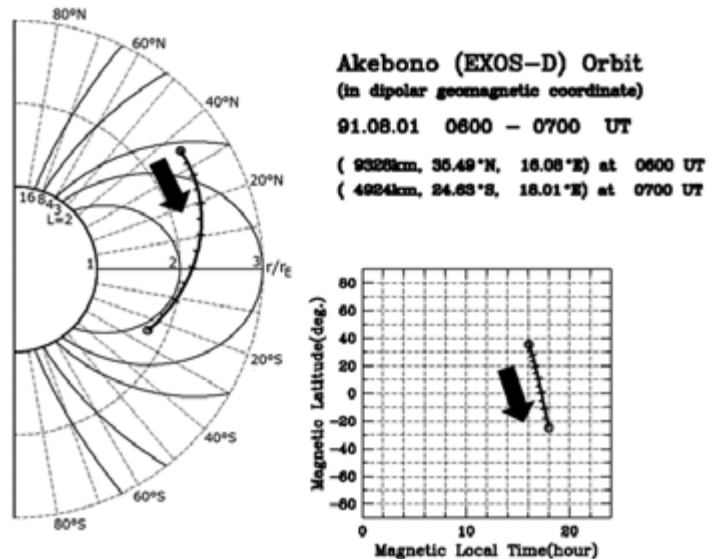


図9 1991年8月1日6:00:00~7:00:00UTのあげぼの衛星の軌道

滑らかに波形をつなぐ処理を自動的に行える信号処理システムを確立しなければ、数十 TB に及ぶ大量データをシステムティックに復調・強度補正することは不可能である。

また本論文でも述べたように、DAT は磁気テープのため、経年劣化を起こしつつあり、すでに DAT に記録されていたデータの一部が、テープの劣化により読み取り困難になっている問題がある。具体的には、左チャンネルに記録されているタイムコードが信号波形の歪みによって、デコードできない時間帯が存在する。左チャンネルが歪んでいるということは、実データそのものも歪んでいる可能性もあるが、その問題を除いても、時刻が同定できない時間帯は、時刻情報がデコードできた前後の時刻情報から何らかの方法で補完を行う必要がある。このような劣化が起きたデータの取り扱いが今後の課題である。

最後に、WBA は 14kHz 以下の周波数帯をすべて網羅した広帯域受信器であることから、狭帯域のフィルタバンクで観測した MCA などにも比べてもともとデータの S/N 比が良くない上に、アナログテレメトリによる伝送の過程でも雑音が重畳するため、ある特定の波動現象をシステムティックに抽出したり、観測データを網羅的に統計解析に用いるには事前に十分なデータクリーニングが必要である。データ総量が数十 TB におよぶ巨大データであることから、今後、より高度な情報処理技術の研究・開発が必要であろう。

## 5. 結論

本論文では、25 年超に及ぶ長期間観測を実現した、磁気圏観測衛星あけぼのに搭載された VLF 観測装置のサブシステムとして、14kHz 以下のアナログ波形データを観測する WBA 装置について、データ取得から強度校正に至るまでの現状報告を行った。計算機技術の進歩に伴い、これまで取り扱いが困難であったアナログデータを、ルーチン的にデジタル化し、源泉が異なる時刻情報が付与された HK データをもとに、自動的に強度補正を行うデータ処理システムの開発に取り組み、完成させることができた。

さらに衛星軌道に沿って WBA が連続的に観測した雷起源ホイスラの分散値の時間変化の情報が、地球磁気圏内のグローバルな電子密度推定に有用であることを述べた。今後、数多くの雷起源ホイスラの分散値を求めることで、ホイスラ波動の伝搬特性を明らかにするとともに、グローバルな電子密度プロファイルの推定に役立てたい。

また本論文では触れなかったが、あけぼの衛星は放射線帯を横切るユニークな軌道を取ることから、磁気嵐に関与するコーラス波動など、内部磁気圏物理の解明に重要な波動現象を多数計測している。近年、多くの磁気圏観測衛星がプラズマ波動の波形観測機能を有するが、機上でのデジタル波形の取得は、データ容量が巨大になりすべてのデータを地上伝送できないため、間欠観測とならざるを得ない現状がある。それに対し、WBA はアナログ観測器の特性を活かして、長時間の連続波形を取得・地上伝送できることから、これらの波動現象の詳細なスペクトル構造の解明に大変有用である。

アナログデータゆえの取り扱いの困難さから、これまで十分活用が進んでいなかった WBA 波形データであるが、現在の計算機技術を活かして、今後さらなる利活用が進むことを期待したい。

## 謝辞

あけぼの WBA データの強度補正システムの開発と改善にご協力いただいた、越山 祐一氏（現在、(株) PFU プラットフォーム開発事業部）ならびにレ タム ホアイ氏（現在、(株) アレクシード）に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) H. Oya, and K. Tsuruda, Introduction to the Akebono (EXOS-D) Satellite Observations, *J. Geomagn. Geoelectr.*, 42(4), 367-370, 1990.
- 2) 山本 正幸, 木村 磐根, 長野 勇, 橋本 弘藏, 岡田 敏美, 林 幹治, 澤田 晃, 伊藤 嘉彦, 軒内 栄一, 岸 洋司, 笠原 禎也, あけぼの (EXOS-D) 搭載 VLF 装置による初期観測結果, 宇宙科学研究報告, 特集 25, 63-73, 1990.
- 3) I. Kimura, K. Hashimoto, I. Nagano, T. Okada, M. Yamamoto, T. Yoshino, H. Matsumoto, M. Ejiri, and K. Hayashi, VLF Observations by the Akebono (EXOS-D) Satellite, *J. Geomagn. Geoelectr.*, 42(4), 459-478, 1990.



- 4) Lynx Studio Technology, Lynx AES16e, <https://www.hookup.co.jp/products/lynxstudio/aes16e.html>, (2014年6月8日参照).
- 5) D. L. Carpenter, Remote Sensing of the Magnetospheric Plasma by Means of Whistler Mode Signals, *Reviews of Geophysics*, 26(3), 535-549, 1988.
- 6) I. Kimura, Effects of Ions on Whistler-Mode Ray Tracing, *Radio Science*, 1(3), 269-283, 1966.
- 7) I. Kimura, and Y. Goto, Ray Tracing, <http://waves.is.t.kanazawa-u.ac.jp/>, (2014年6月8日参照).
- 8) I. Kimura, Y. Kasahara, and H. Oya, Determination of Global Plasmaspheric Electron Density Profile by Tomographic Approach Using Omega Signals and Ray Tracing, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 63(11), 1157-1170, 2001.
- 9) Y. Goto, Y. Kasahara, and T. Sato, Determination of Plasmaspheric Electron Density Profile by a Stochastic Approach, *Radio Science*, 38(3), 1060, doi:10.1029/2002RS002603, 2003.
- 10) I. P. A. Bayupati, Y. Kasahara, and Y. Goto, Study of Dispersion of Lightning Whistlers Observed by Akebono Satellite in the Earth's Plasmasphere, *IEICE Trans. Communications*, E95-B(11), 3472-3479, 2012.