

# 科学衛星搭載プラズマ波動観測器のための 汎用データアーカイブファイル形式の設計

---

奥田拓希<sup>1</sup>, 松田昇也<sup>2</sup>, 笠原禎也<sup>1</sup>, 笠羽康正<sup>3</sup>, 土屋史紀<sup>3</sup>, 三好由純<sup>2</sup>  
(1. 金沢大学, 2. 名古屋大学, 3. 東北大学)

# Outline

## 1. 研究背景

- 科学衛星の汎用フォーマット化

## 2. ERG衛星搭載PWE観測データのアーカイブ設計

- PWE (Plasma Wave Experiment) の概要
- PWEの観測データ

## 3. CDF (Common Data Format)

## 4. 科学衛星データの汎用的なCDF化ソフトウェア

## 5. ERG/PWEの高次科学データの定義

## 6. ERG/PWE高次科学データの作成と評価

- Level 0 → Level 1 CDF
- Level 1 → Level 1' CDF

## 7. 将来ミッションへの応用

- 水星磁気圏探査機MMO搭載プラズマ波動観測装置PWI
- MMO/PWIにおけるOFA-SPECのCDF

## 8. 結論まとめ

# 研究背景 (1/2)

## 近年数多くのSTP系衛星の打ち上げを予定


### 2016年 ジオスペース探査衛星 ERG (Arase)

- ・初めて波動と粒子の相互作用を直接観測
- ・高エネルギー粒子発生のメカニズムなどの解明が期待
- ・Van Allen probesなどの海外の観測計画との連携を予定

### 2018年度予定 水星磁気圏探査機 MMO

- ・地球の磁場・磁気圏および宇宙に存在する様々な磁気圏の解明が期待 etc.

## 人工衛星で取得したデータを国内外で広く利活用できる仕組みが必要

 科学データの解析利便性向上のため適切なデータアーカイブ設計

CDFを用いたジオスペース探査衛星ERGの観測データ利用向け  
**プラズマ波動観測器PWEの地上データ処理システム**を開発  
今後の観測データアーカイブ設計を見据えた汎用的な作成手法

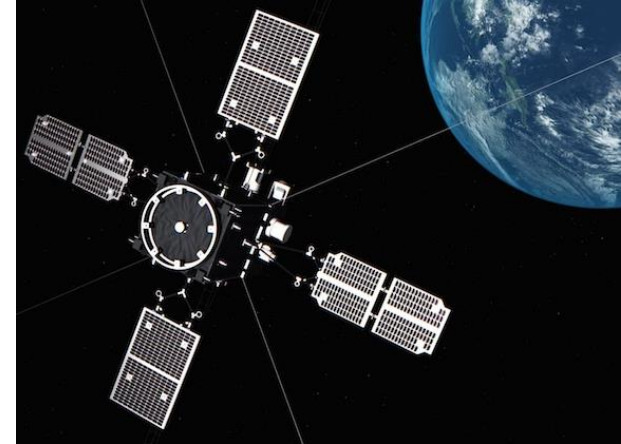
# ジオスペース探査衛星 ERG

## ERG; Exploration of energization and Radiation in Geospace

### 目的

内部磁気圏での粒子・電磁場・波動の総合観測による

放射線帯の粒子加速、輸送、消失過程の解明  
宇宙嵐のダイナミクスの解明



(C) JAXA

### ERG搭載観測機器

#### PPE

幅広いエネルギーレンジの電子 (12 eV~20 MeV),  
イオン (10 eV/q~180keV/q)の観測.

#### MGF

DCから数10 Hzの背景磁場および電磁波動の観測.

#### PWE

電界DCから10 MHz, 磁界数Hzから100 kHzの電磁界の波形とスペクトル観測.

#### S-WPIA

プラズマ波動と粒子との相互作用過程を直接検出.

打ち上げ予定日	2016/12/20 (JST)	
衛星高度	近地点	およそ300 km
	遠地点	およそ30000 km
軌道傾斜角	およそ31度	
スピン周期	8秒	

# プラズマ波動観測器 PWE

## PWE搭載装置

### EFD (電場計測器)

DCから100Hzの低周波電場の観測

### WFC (波形捕捉受信器)/OFA (機上周波数分析器)

10 Hzから20 kHzの電磁波・静電波を波形で捉える観測器

### HFA (高周波分析器)

電界:10 kHzから10 MHz , 磁界: 10 kHzから100 kHzの電磁波を観測

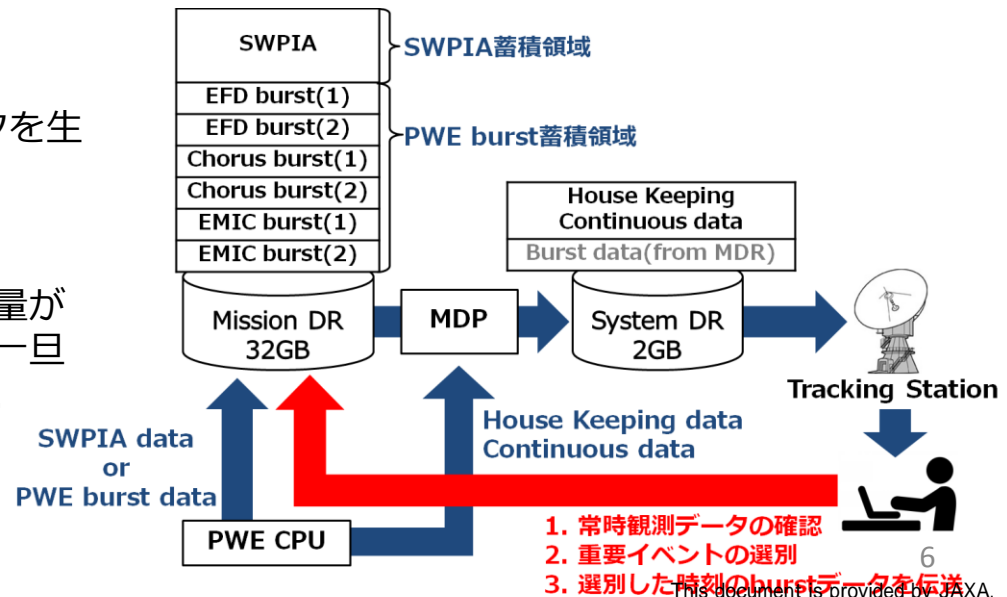
PWEが地上伝送するデータは**常時観測データ**と**バースト観測データ**の2種類

## 常時観測データ

PWEが観測状態であれば24時間連続でデータを生成。すべての観測データが地上に伝送される。

## バースト観測データ

特定時間・領域の間欠データを生成。データ量が大きく全観測データを地上に伝送できないため、一旦衛星機上のデータレコーダーに伝送・蓄積する。



# PWEの観測データ

## PWE (Plasma Wave Experiment)

### EWO (EFD/WFC/OFA)

サブ機器	データ内容	
<b>本研究では主にOFA/WFCを対象にCDF作成 他サブ機器, 他衛星のためのデータアーカイブ設計の指針に</b>		
WFC (波形捕捉受信器)	常時観測	なし
	バースト観測	<b>波形</b> ( Chorus mode : fs = 65536 Hz EMIC mode : fs = 1024 Hz )
OFA (機上周波数分析器)	常時観測	<b>パワースペクトル, スペクトルマトリクス 複素スペクトル</b> ( 通常観測モード: 20 kHz以下を観測 特殊観測モード: 電界の場合120 kHz以下 磁界の場合7 kHz以下を観測 )
	バースト観測	なし

### HFA (高周波分析器)

常時観測データ	<b>スペクトル</b> ( 電界の場合: 10 kHz < f < 10 MHzを観測 磁界の場合: 10 kHz < f < 100 kHzを観測 ) <b>プラズマ密度</b> (UHR周波数より読み取り)
---------	--

# PWE OFA/WFCの観測モード

**受信器のゲイン: 0 dB ~ 60 dBまで20 dBステップで切り替え可能**

電界: 0 dB/20 dB/40 dB/60 dB

磁界: 0 dB/20 dB

**サンプリングレート: 電磁界ともに2つのモードを有する**

電界: 65.536 ksps/262.144 ksps

磁界: 65.536 ksps/16.384 ksps

**LPFカットオフ周波数: 2つのモードを有する**

通常観測: ~ 20 kHz

特殊観測: ~ 120 kHz(電界), ~ 7 kHz (磁界)

**OFA SPEC時間分解能 (周波数分割数): 4つのモードを有する**

$\Delta t = 0.5/1.0/2.0/4.0$  s (66/132/264/528 pts)

**WFC Burst mode: サンプリングレートに応じ2つのモードを有する**

Chorus Burst ( $f_s = 65536$  Hz)

20 kHz以下の波形データ (電界2成分, 磁界3成分) を出力

EMIC Burst ( $f_s = 1024$  Hz)

500 Hz以下の波形データ (電界2成分, 磁界3成分) を出力

etc.

**OFA/WFCに限定しても様々な観測モードを有する**

# Common Data Format (1/2)

(開発元: NASA/GSFC National Space Science Data Center)

## さまざまな利点をもつデータフォーマットおよびソフトウェアライブラリ

- プラットフォームに依存しないためさまざまな環境下での使用が可能
- SPEEDAS, Autoplot**等, CDFに対応するツールで描画可能

### Van Allen probesの観測データ

- 観測データとメタデータを格納する



CDFでは変数と属性により管理

### 変数: 観測データを格納

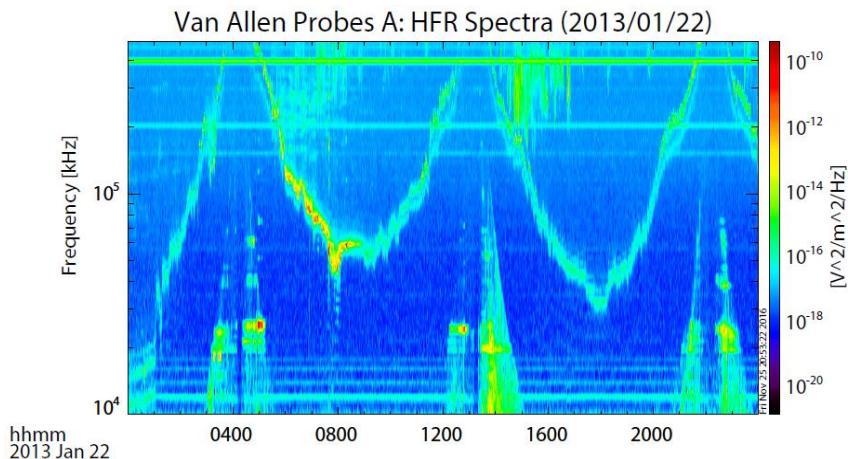
異なる次元, 型を持つデータを複数の変数を用いて1つのCDFファイルに格納可能.

### 属性: メタデータを設定

ユーザー定義情報をg属性とv属性を用いて管理

g属性…CDF全体に共通するメタデータを格納 (例: 衛星名, PI名など)

v属性…CDF中の各データ固有のメタデータを格納 (例: 観測値の単位など)



ERG衛星同様内部磁気圏の観測を行う



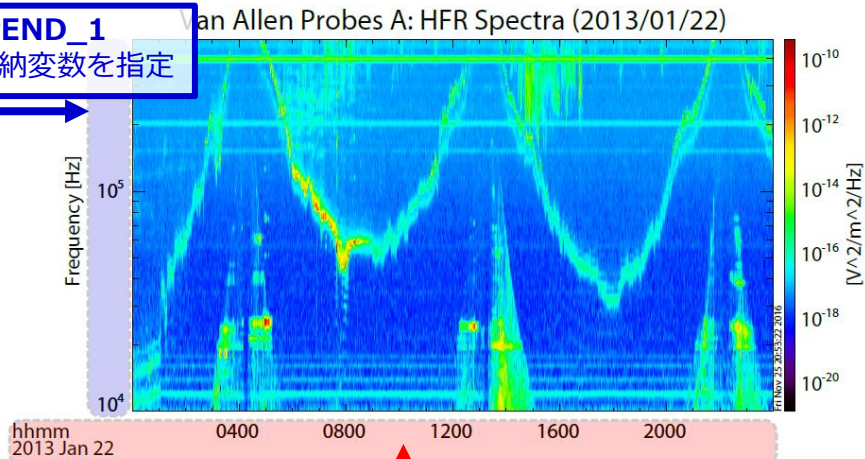
# Common Data Format (2/2)

## スペクトルCDFの内容

record番号	観測時刻 (UTC)	Spectrum (82 pts.)
1	2016/1/22T 00:00:00.000	○,○,⋯,○,○ [v <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> /Hz]
2	2016/1/22T 00:00:06.000	△,△,⋯,△,△ [v <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> /Hz]
3	2016/1/22T 00:00:12.000	□,□,⋯,□,□ [v <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> /Hz]
⋮		
record番号	中心周波数の値 (82 pts.)	
1	10000,⋯,486968.0 [Hz]	

変数間の対応付けはv属性“**DEPEND**”で設定

**DEPEND\_1**  
周波数格納変数を指定

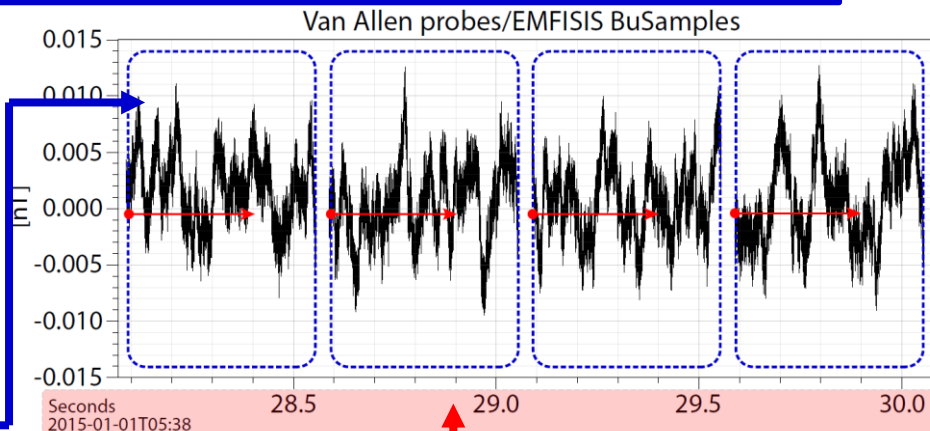


**DEPEND\_0**: 時刻格納変数を指定

## 波形CDFの内容

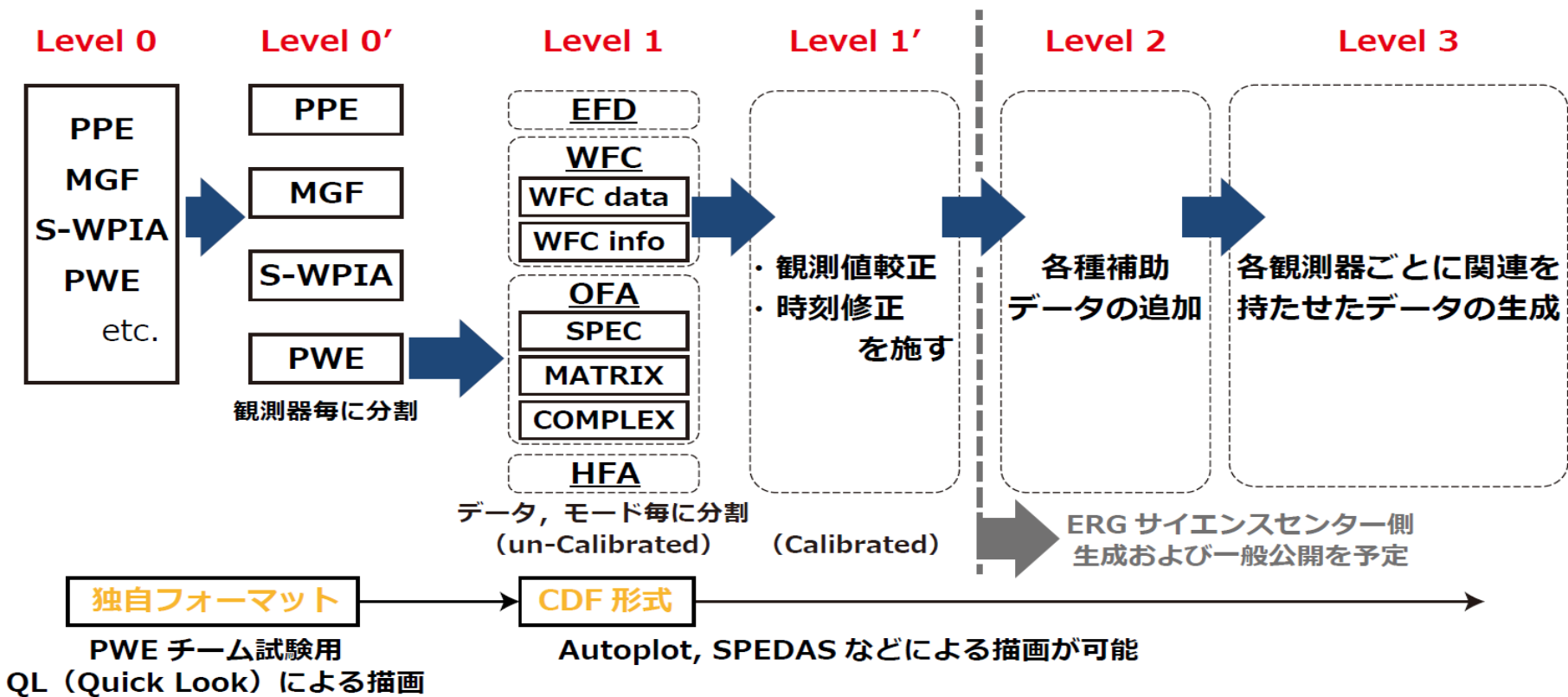
record番号	先頭データの時刻 (UTC)	Waveform (16384 pts.)
1	2016/1/22T 05:38:28.100	○,○,⋯,○,○ [nT]
2	2016/1/22T 05:38:28.600	△,△,⋯,△,△ [nT]
3	2016/1/22T 05:38:29.200	□,□,⋯,□,□ [nT]
⋮		
record番号	先頭時刻からの時間刻み (16384 pts.)	
1	0,⋯,468085696.0 [ns]	

サンプリング周波数に応じ一定幅のデータを1 recordに保存  
**DEPEND\_1**: 先頭からの時間刻みを格納した変数を指定



**DEPEND\_0**: 時刻格納変数を指定

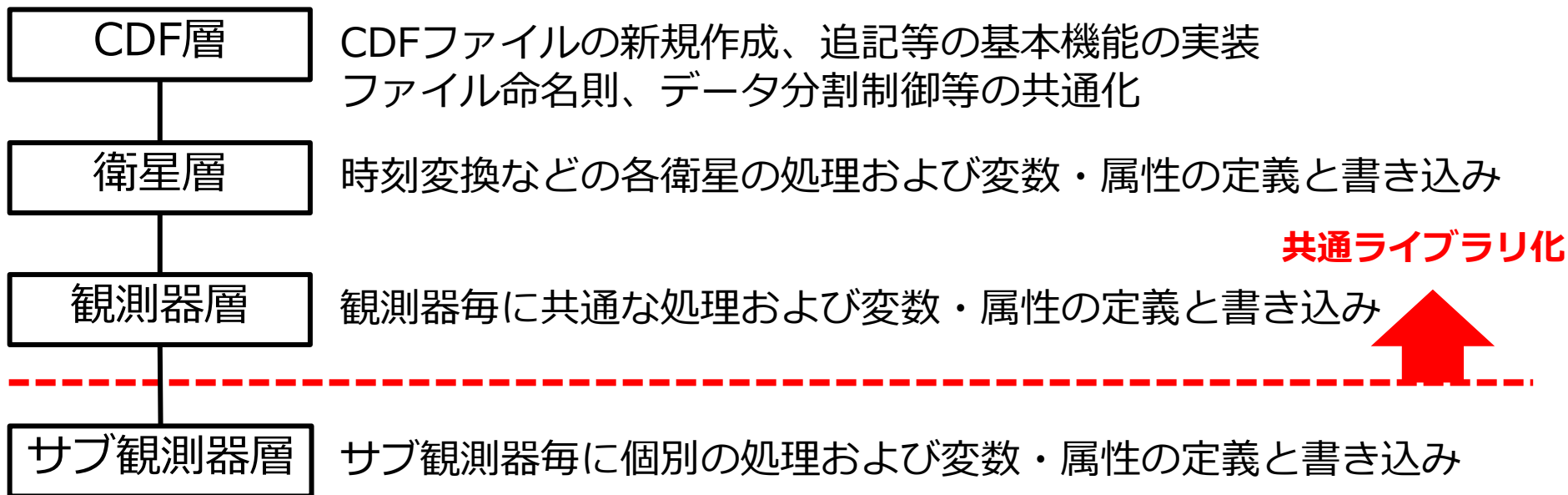
# ERG PWE高次科学データの定義



- テレメトリデータを各階層に分けて管理
- Level 1以降はCDF (最新のISTP/IACGガイドラインに基づく) に変換
- Level 1以降は**作成するCDFファイルの複雑化**
- 観測モード・レベル毎での**標準のCDFライブラリを用いると観測モード・レベル毎でのプログラム作成が必須**

# CDF作成ソフトウェアの構造の検討

複数のサブ観測器，多種多様な観測モードに対応するための  
データフォーマットおよびソフトウェアの構造を定義



他の観測器や今後打ち上げ予定の科学衛星データの  
CDF化にも利用可能な汎用プログラムの作成

# ERG PWE Level 1 CDF

## PWEテレメトリデータ

データにUTCが割り振られていない  
バースト観測データの場合時系列順でない場合もある

## Level 1 CDF 作成プログラム

### TI → UTC変換の実装

- ・衛星の時刻カウンタ（TI）よりUTCを算出  
（C-SODAによって作成された時刻較正システム（TIMECAL）の利用）
- ・より高精度なUTCへ変換するためS-WPIAカウンタの値を併用

### UTCよりデータを格納するCDFを決定

### 時系列順への整列

データ生成スクリプト上で実装

- ・データを末尾に格納後CDFtoolkitによる時刻順への整列

## Level 1 CDF

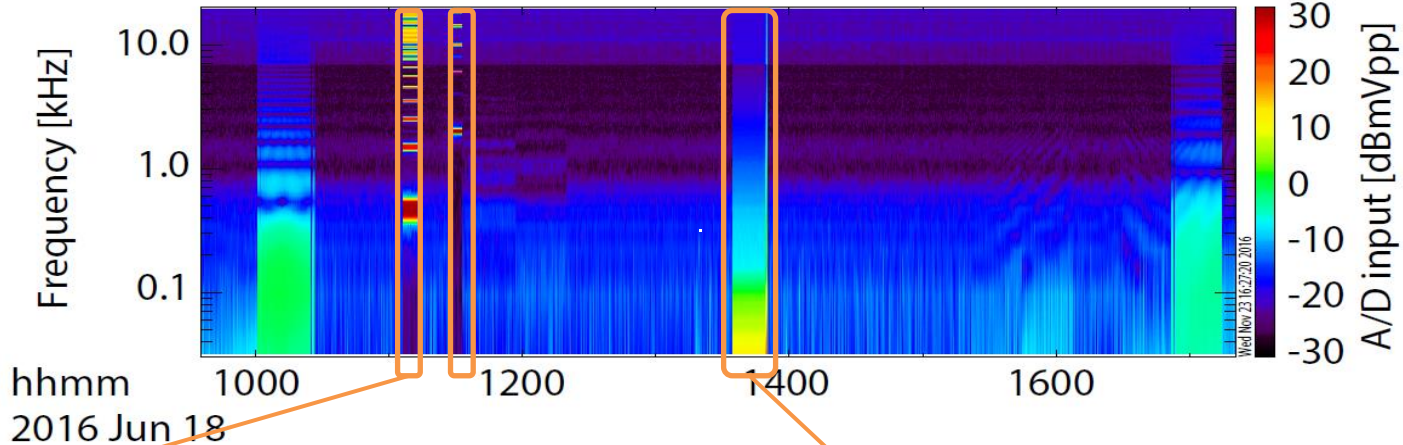
- ・観測モード単位、観測時間毎での管理
- ・Autoplot, SPEDASによる容易な描画が可能
- ・UTCによる描画可能
- ・時系列順に整列

容易なデータ管理・解析が可能

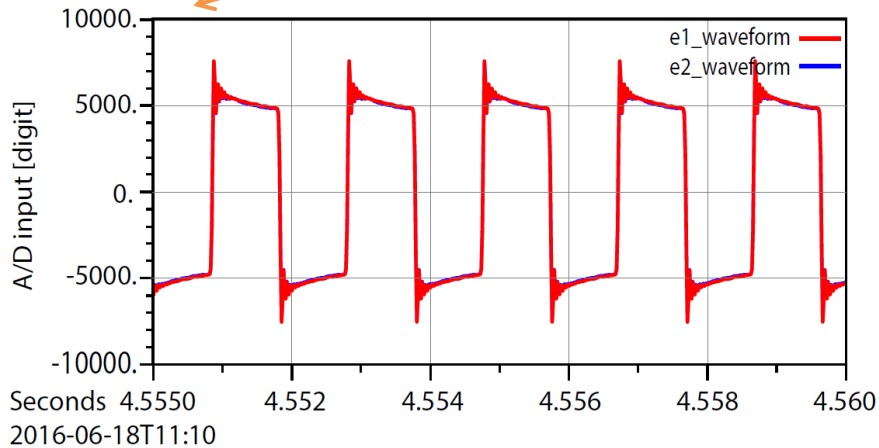
# ERG PWE Level 1 CDF

## 2016/06/18 ERG PWE地上試験データを用いたLevel 1 CDFの作成

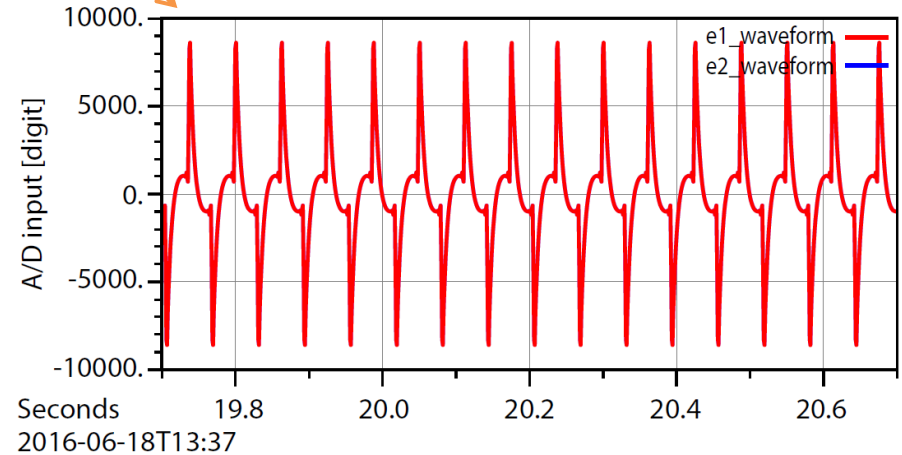
Level 1 PWE/OFA-E SPEC (time res. = 1.0 s, 2016/06/18)



Level 1 PWE/WFC-E Waveform (Chorus burst, 2016/06/18)



Level 1 PWE/WFC-E Waveform (EMIC burst, 2016/06/18)



- 主に無信号 (白色ノイズ) 区間と校正信号 (矩形波) が見られる
- 試験記録と今回の結果を比較 ➡ 試験時の動作を正しく格納できていることを確認

# OFA-SPEC CDF v属性の設定

	変数名	epoch	frequencies_132pts	spectra_132pts
V属性	DEPEND_0	""	""	"epoch"
	DEPEND_1	""	""	"frequencies_132pts"
	DISPLAY_TYPE	""	""	"spectrogram"
	FIELDNAM	""	""	"spectra_132pts"
	LABLAXIS	""	"Frequency"	"A/D input"
	UNITS	"ns"	"Hz"	"dBmVpp"
	VAR_TYPE	"support_data"	"support_data"	"data"
	SCALETYP	"linear"	"log"	"linear"

変数同士の対応付け

描画方法

単位の指定

描画時のスケール

## v属性の設定により 自動的な描画が可能

1レコードに単位時間当たりの  
観測周波数範囲でのスペクトルを格納

Record 番号	時刻情報 (変数)	スペクトルデータ (変数)
1	01-01T00:00:00	○○……○○
2	01-01T00:00:01	○○……○○
3	01-01T00:00:02	○○……○○
4	01-01T00:00:03	○○……○○
5	01-01T00:00:04	○○……○○
6	01-01T00:00:05	○○……○○
7	01-01T00:00:06	○○……○○

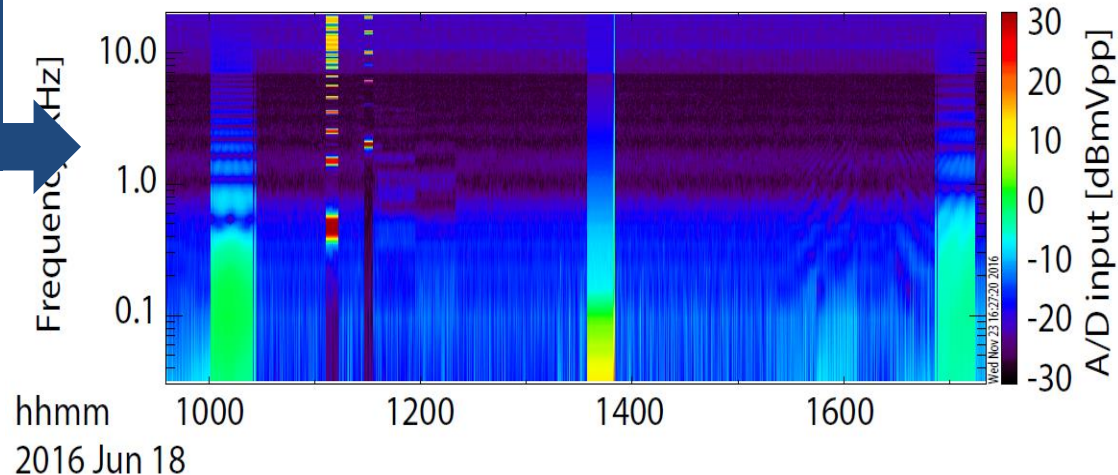
スペクトルと時刻情報に依存関係を持たせる  
(変数間のレコード数は等しくなるように設定)

スペクトルと中心周波数に依存関係を持たせる  
(変数間の要素数は等しくなるように設定)

Record 番号	中心周波数 [Hz] (変数)
1	○○……○○

1レコードに観測周波数の値を格納

Level 1 PWE/OFA-E SPEC (time res. = 1.0 s, 2016/06/18)



# WFC burst CDF v属性の設定

	変数名	epoch	time_offsets	e1_waveform
V属性	DEPEND_0	""	""	"epoch"
	DEPEND_1	""	""	"time_offsets"
	DISPLAY_TYPE	""	""	"waveform"
	LABLAXIS	""	"interval time"	"A/D input"
	UNITS	"ns"	""	"digit"
	VAR_TYPE	"support_data"	"support_data"	"data"
	SCALETYP	"linear"	"linear"	"linear"

変数同士の対応付け

描画方法

単位の指定

描画時のスケール

v属性の設定により  
自動的な描画が可能

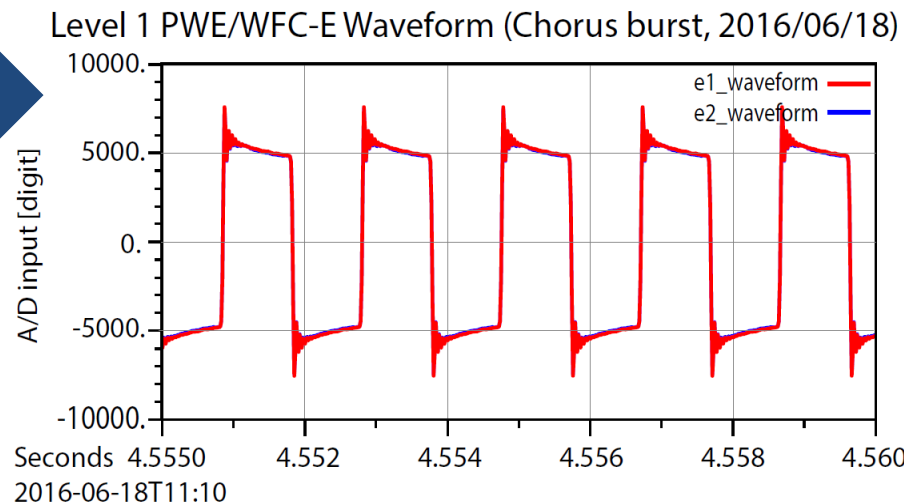
1レコードにサンプリング点数分の  
波形データを格納

Record 番号	時刻情報 (変数)	波形データ (変数)
1	01-01T00:00:00	○○○○○
2	01-01T00:00:05	○○○○○
3	01-01T00:00:10	○○○○○

先頭波形データの時刻  
(変数間のレコード数は等しくなるように設定)

時刻が割り振られていないデータは  
先頭からの経過秒 (固定長) を参照  
(変数間の要素数は等しくなるように設定)

Record 番号	データ先頭からの経過秒
1	0, 1, 2, 3, 4



# ERG PWE Level 1' (Level 2) CDF

## Level 1 CDF

- ・ 観測値較正がされておらずそのままでは科学解析に適さない
- ・ 衛星時刻TIに1 spinのずれがありTIおよび観測時刻 (UTC) の修正が必要

## Level 1' CDF 作成プログラム

## 科学解析のための処理

### 観測値較正関数

- ・ 受信器・衛星の飛行領域を考慮した観測値較正や位相較正が必要
- 受信器毎・飛行領域毎に周波数特性を求めて較正用にテーブル化**

➡ **較正テーブル**を読み込み、処理を実装する関数の作成  
(提供元：名古屋大学 松田昇也氏)

### 時刻補正関数

- ・ ERG衛星のスピンレートを考慮した1スピンずれの修正を行う関数

PWEチーム側

ERG Science Center側

各種補助データ

作業の切り分け

Level 2 CDF

公開データ



# 将来ミッションへの応用

2018年度に水星磁気圏探査機MMO打ち上げ予定

- ・ 固有磁場の解明
- ・ 地球と異なる特異な磁気圏の解明
- ・ 水星表面から出る希薄な大気の解明
- ・ 太陽近傍の惑星間空間を観測



(C) JAXA

## MMO搭載観測機器

- MPPE : 電子・イオン高速中性粒子のエネルギー・質量分析
- MGF : 磁場観測
- PWI : 電場, プラズマ波動, 電波, 電子密度・温度の計測**
- MSASI : ナトリウム大気の撮像
- MDM : 水星・惑星間・恒星間ダストの観測

プラズマ波動観測装置PWIの観測データもCDF形式でアーカイブする方針

**本研究でのCDF作成ソフトウェアが汎用的に応用できることを実証  
MMO PWI/OFAの地上試験データのCDF化を行う**

# PWIの観測データ

## L-mode

PWEが観測状態であれば24時間連続でデータを生成。  
すべての観測データが地上に伝送される。

## M-mode

PWEが観測状態であれば24時間連続でデータを生成。  
L-modeの観測データより選別したのち地上に伝送される。

## H-mode

特定領域や時間に絞って運用される高時間分解能モード

### PWI/OFAの場合

ERG/PWEのパラメータの一部変更により  
現在のソフトウェア構造をそのまま使用可

#### 各成分

L-mode	電磁界各1成分
M-mode	電磁界各2成分

#### 時間分解能 (周波数分割数)

L-mode	$\Delta t = 2.0/4.0/8.0$ s (freq. = 18/36/72 pts)
M-mode	$\Delta t = 1.0/2.0/4.0$ s (freq. = 90/180/360 pts)

#### 上限周波数

SW mode	~ 120 kHz (電界) , ~ 6 kHz (磁界)	
MS mode	~ 20 kHz	etc.

# PWI/OFA CDF

## 2015/12/01に実施された地上試験時のCDF化

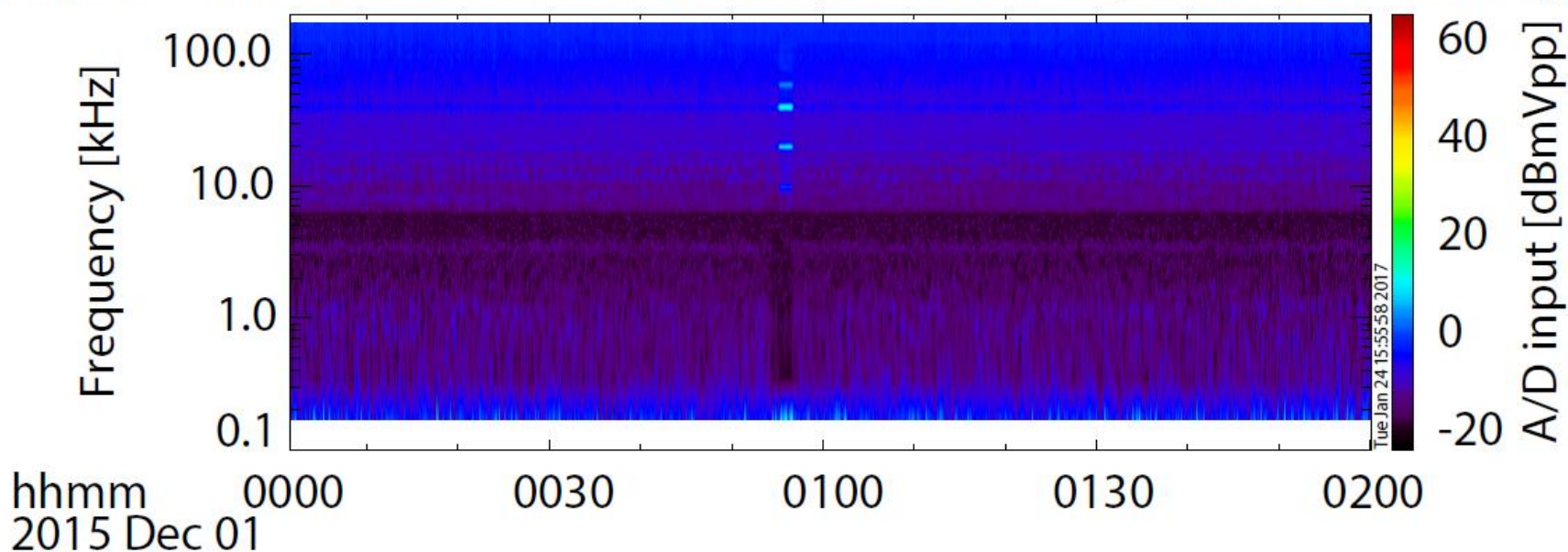
- ・ 汎用ソフトウェアの一部変更（v属性の変更と変数の要素数の変更）
- ・ PWE/OFAと観測モードは異なるがわずかな修正のみ



観測モードが多様なPWI/OFAでもCDF化を実現

### OFA L-modeの場合

MMO PWI/OFA-E L-mode Data (2015/12/01, time res. = 8.0 s)



# まとめ・今後の課題

ERG搭載PWEの高次科学データフォーマットの検討  
科学衛星データのCDF化を実現する汎用ソフトウェアの作成

## ERG/PWEのOFA-SPECおよびWFCのCDF作成

- ・データを観測器毎に分類，正しく時刻補正されたCDFファイルを作成
- ・AutoplotやSPEDASで描画可能な汎用性のあるCDF
- ・地上試験のデータより正しい結果が得られていることを確認

## MMO/PWIのOFA-SPECのCDF作成

- ・ソフトウェアの一部変更により汎用的に用いることが可能に
- ・他のSTP系科学衛星へも汎用的に応用可能
- ・MMO衛星の場合ヨーロッパが担当するデータに対しても拡張する必要がある