

# SS-520-3 ロケット実験における電場・プラズマ波動観測

頭師 孝拓(奈良高専)、石坂 圭吾(富山県立大)、笠原 禎也(金沢大)、尾崎 光紀(金沢大)、栗田 怜(京都大)、八木谷 聡(金沢大)、加藤 雄人(東北大)、小嶋 浩嗣(京都大)

## 1. はじめに

極域カスプにおけるイオン流出機構の解明を目的として、観測ロケットSS-520-3号機が2021年11月4日にアンドーヤスペースセンタースバルバードロケット実験場から打ち上げられた。本ロケットに搭載された低周波プラズマ波動解析システム(LFAS:Low Frequency Analyzer System)は、イオンの加速機構の解明に重要な役割を果たすプラズマ波動とDC電場の測定を行う観測器である。また、LFASにはSS-520-3号機に搭載された粒子系観測器である熱的イオン分析器(TSA:Thermal Ion Spectrum Analyzer)及び低エネルギーイオンエネルギー質量分析器(IMS:Ion Mass Spectrometer)との連携観測を行うシステムである波動粒子相互作用観測装置(SWPPIA)も搭載されている。これらにより、イオンの加熱領域で高時間分解能のその場観測を行い、波動と粒子の間のエネルギー授受を定量的に捉えることを目的としている。

## 2. 観測器

### 2.1. LFASの概要

図1にLFAS全体のブロック図を示す。LFASは、電界センサーであるLFAS-S、プリアンプLFAS-Preおよび2種類の受信器EFD(Electric Field Detector)、WFC(WaveForm Capture)から構成されており、これに加えてWFCにはSWPIAが搭載されている。

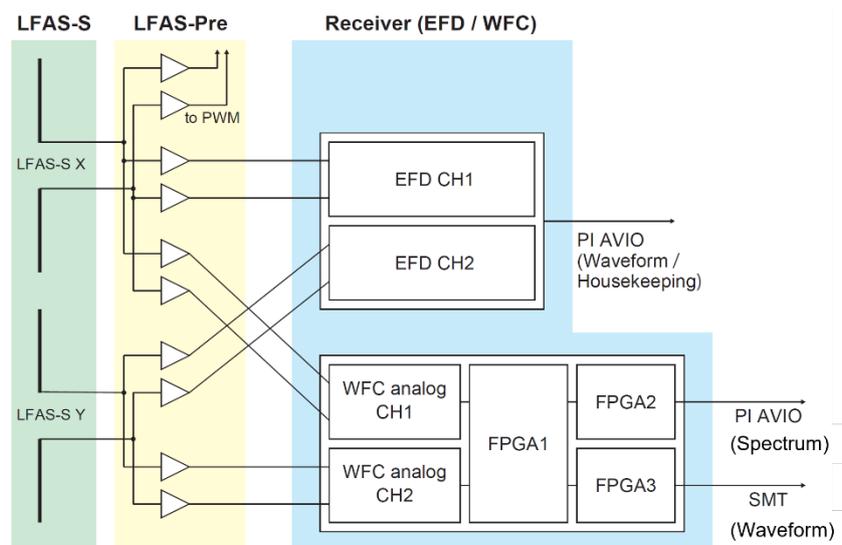


図1. LFASのブロック図

## 2.2. センサーおよびプリアンプ

図2に電界センサーであるLFAS-SとプリアンプLFAS-Preのロケット上での配置図を示す。LFAS-Sは長さ3mのエレメント4本から構成される電界センサーである。センサーはLFASの受信器EFD, WFCに加え、高周波プラズマ波動観測器であるPWM(Plasma Wave Monitor)とも共有している。各センサーは打ち上げ前には巻き付けて収納されており、打ち上げ後にタイマー信号によりロック解除され、それに伴って自己伸展する。X成分に相当するS1およびS2の伸展信号は打ち上げから106秒後に送られ、Y成分に相当するS3およびS4の伸展信号は打ち上げから110秒後に送られる。LFAS-Sからの信号はセンサーの直後に配置されたPWMを含む各受信器のプリアンプへと送られる。

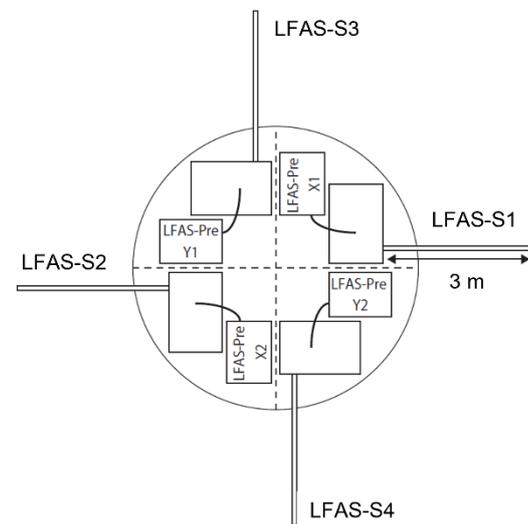


図2 LFAS-S及びLFAS-Preの配置図

## 2.3. 受信器

LFASにはDC/ELF帯受信器であるEFDとVLF帯受信器であるWFCの2種類の受信器が搭載されている。EFDはXとYの2成分について、シングルプローブ及びダブルプローブでの電界波形観測を常時実施する。シングルプローブの観測帯域はDC-20 Hz、ダブルプローブの観測帯域はDC-400 Hzとなっている。

WFCは波形と周波数スペクトルの2種類の観測データを取得する。波形は打ち上げ後0秒から330秒までの間にX成分のみリアルタイム観測が行われる。カスプ領域の通過が見込まれる330秒から630秒の間はX成分のリアルタイム観測に加えY成分の観測とオンボードメモリへの保存を行う。その後630秒からはリアルタイム観測は行われず、代わりに保存されたY成分データのテレメータへのリプロが行われる。スペクトルデータはX成分のリアルタイム観測が常時行われる。EFD及びWFCの観測シーケンスを図3に示す。WFCの波形2成分観測が行われる時間には後述するSWPIA

による TSA/IMS と同期した時刻データの付与も行う。WFC の観測帯域は波形、スペクトルどちらも 10 Hz- 10 kHz となっている。WFC には超小型プラズマ波動受信器の実現に向け開発が進められてきた専用集積回路が使用されており、観測器の小型化に寄与している。

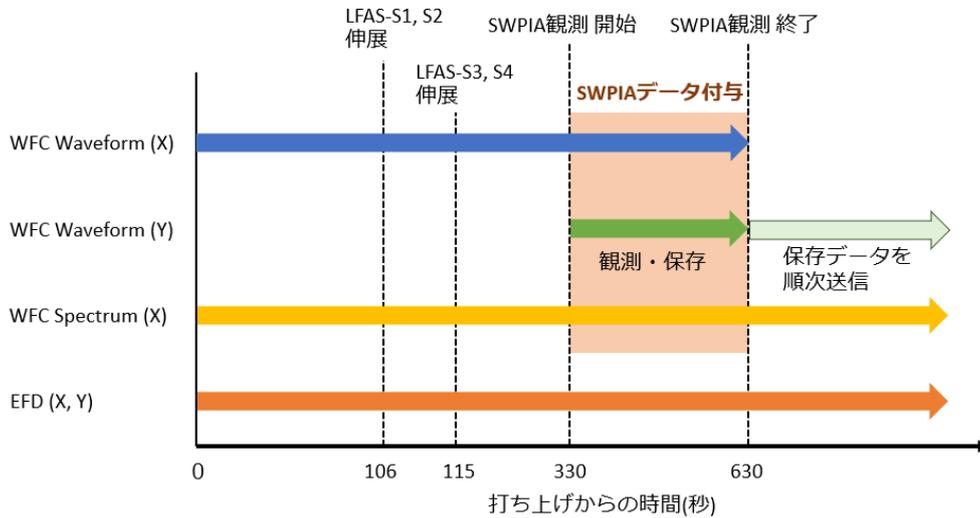


図 3 LFAS に搭載された各受信器の観測シーケンス

#### 2. 4. 波動粒子相互作用観測装置

波動観測器である LFAS と粒子系観測器である TSA/IMS の同期観測を行うためのシステムとして、WFC 内にソフトウェア型の波動粒子相互作用観測装置 (SWPIA) を搭載している。SWPIA は 160 kHz のクロック信号と SWPIA カウンタ (16 bit)、リセットカウンタ (24 bit) と呼ばれる 2 種類のカウンタを持つ。SWPIA はクロック信号により SWPIA カウンタをカウントアップし、10 ms ごとに生成されるリセット信号により SWPIA カウンタをリセットする。リセット回数はリセットカウンタにより記憶され、2 つのカウンタ値が観測データに付与される。クロック信号とリセット信号を LFAS から TSA/IMS へ配信し、TSA/IMS 内でも同様のカウントとデータ付与を行うことで、波動・粒子の同期観測を実現する。

### 3. 実験結果

受信器部は EFD、WFC とともに正常に動作し、WFC における波形の観測シーケンスも問題なく行われた。一方で、センサー部において S1、S2、S4 が想定された時刻に伸展しなかったことが確認された。伸展に異常のあったセンサーのうち、S2 は本来と異なる時刻である打ち上げから 365 秒後頃に全伸展したとみられている。これらの結果、SWPIA 観測を行っている期間の大半で X、Y とともにモノポールでの観測を行っていたこととなる。

図 4 に打ち上げから全期間の WFC スペクトルデータを示す。スペクトルデータは X 成分 (S1, S2) の観測を行っているため、365 秒頃まではセンサーがどちらも伸展していない。365 秒頃に S2 の伸展に伴うノイズが見られ、その後は 10 kHz 付近のオーロラヒスなど自然波動も観測されている。低い周波数に見られる広帯域な波動の大半はノイズと考えられるが、一部の時刻においてはノイズと

は性質の異なる広帯域な低周波が観測されている。この低周波は従来のロケット実験においてイオン加熱に伴って観測された波動である BBELF (Broadband Extremely Low Frequency) 波動を含んでいる可能性があると考え、解析を進めている。

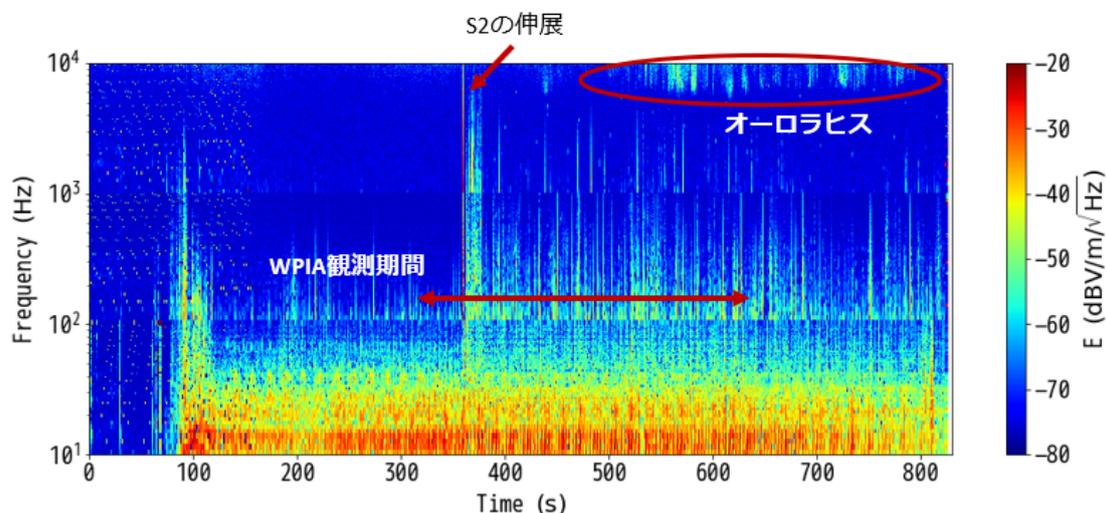


図4 WFC のスペクトル観測で取得された全期間のデータ

EFDにおいても全期間で観測データが正常に取得できていることを確認した。本来ダブルプローブ観測によって電極間の電位差を観測することで電場を算出する予定であったが、本観測においては正常に伸展した S2 および S3 のシングルプローブデータとロケット姿勢から電場ベクトルを算出する。

#### 4. まとめ

極域カuspにおけるイオン流出機構の解明を目的として打ち上げられた観測ロケット SS-520-3号機において、プラズマ波動及び DC 電場の観測器である LFAS を開発し、観測を行った。LFAS には DC/ELF 帯の受信器である EFD と VLF 帯受信器である WFC に加え、粒子系観測器である TSA/IMS との同期観測を行うシステムである SWPIA が搭載された。ロケットは 2021 年 11 月 4 日にアンドーヤスペースセンタースバルバードロケット実験場から打ち上げられ、新規開発された専用集積回路を使用した WFC を含めて搭載された受信器は全て正常に動作した。しかし、センサー部において一部のセンサーに伸展の異常があり、結果として直交 2 成分のモノポールでの観測となった。観測データに大きな問題はなく、現在 EFD、WFC ともにデータ解析が進められている。