

ロケット観測実験 **SEEK-2** において検出されたプラズマ波動の検証

若林 誠、小野 高幸 (東北大学大学院理学研究科)

1. 概要

夜間中緯度域に発生するスプラディック **E** 層 (**Es** 層) に高い相関を示す準周期エコー現象の解明を目指した **SEEK-2** 観測キャンペーンが、2002年8月3日、宇宙科学研究所鹿兒島宇宙空間観測所において実施された。その際 **23:39JST** に発射された **S310-32** ロケットにはプラズマ波動測定装置 (**Plasma and Wave Monitor** : 以下 **PWM**) が搭載され、**Es** 層及び準周期エコーに関連した電離圏イレギュラリティに伴うと思われる波動現象及び、中性風速を測定する目的で噴射されたトリメチルアルミニウム (以下 **TMA**) の化学反応に伴う波動現象を検出した。観測を実施した当時、**Es** 層は同時に搭載した電子密度測定装置 (**NEI**) により高度105 km付近に観測され、ロケット上昇時の **Es** 層通過に伴って18~19 Hzの波動が検出されている。また、**TMA** は高度80~116 kmにわたって噴射されたが、噴射のタイミングに同期したバースト状の波形が観測され、主な周波数は17 Hz 付近であることがこれまでの解析から明らかになっている。本発表では100 Hz までの波動観測結果に着目し、**Es** 層内及び **TMA** の化学反応に関わる粒子のサイクロトロン周波数を検出した可能性及び解析経過について報告する。

2. これまでの電離圏波動観測

電離圏高度における波動観測は、極域オーロラに関わる地上観測及び飛翔体観測がよく知られている。2000年に実施された宇宙科学研究所の **SS-520-2** による飛翔実験が一つの例として挙げられるが、波動観測の対象としては極域イオン波、オーロラヒス、ユーラスエミッションなど、オーロラ励起高度で卓越する **ELF/VLF** 帯の電磁波であり、高度領域では数100~1000 km以上での観測となる。こういった実験の成果は比較的に数多く報告されている一方で、中緯度域電離圏においての、特に飛翔体による高度100 km以上での波動観測はほとんど行われていない。加えて、**SEEK-2** で行われた **TMA** 噴射にはそのバルブの開閉によるノイズが不可避免的に起こるため、**TMA** 噴射と共に波動観測が行われる例はこれまで殆どなされなかった。これらの意味において、今回の実験はより新しい観測対象を想定した波動観測であったと言える。

今回の観測で測定された波動が、電離圏 **E** 層及び **Es** 層において卓越する荷電粒子のサイクロトロン周波数を検出していたと考えた場合、同時に観測された電子密度のデータを

用いることでその波動の分散関係を明らかにすることができる。それによって、これまで極域程には頻繁に観測されて来なかった中緯度域電離圏における波動現象について、更なる理解を目指すことが本研究の目的である。

3. 装置の概要と観測実施状況

PWM は **BeCu** 製リボンアンテナ一對をダイポールアンテナとして用い、受信した波動は $0 \sim 100 \text{ Hz}$ と $100 \text{ Hz} \sim 10 \text{ kHz}$ にフィルターによって選別され、前者は生波形データを、後者は回路内部の **CPU** で **FFT** 処理したスペクトル波形をテレメータ出力する。受信感度は約 $1 \mu \text{ V/m}$ である。**S310-32** は方位角 108° 、仰角 70° で打ち上げられ、**x+70s** に **PWM** アンテナを伸展し、波動観測を開始した。その後 **x+80s** から、1秒間噴射して1秒間止める (**80~118** 秒及び **242** 秒~**lockoff**) パターンと、2秒間噴射して4秒間止める (**119~241** 秒) という2通りのパターンで **TMA** の噴射を行った。



図1 NEI/PWM 外観



図2 NEI/PWM アンテナ伸展状態 (PWM は下部の2本)

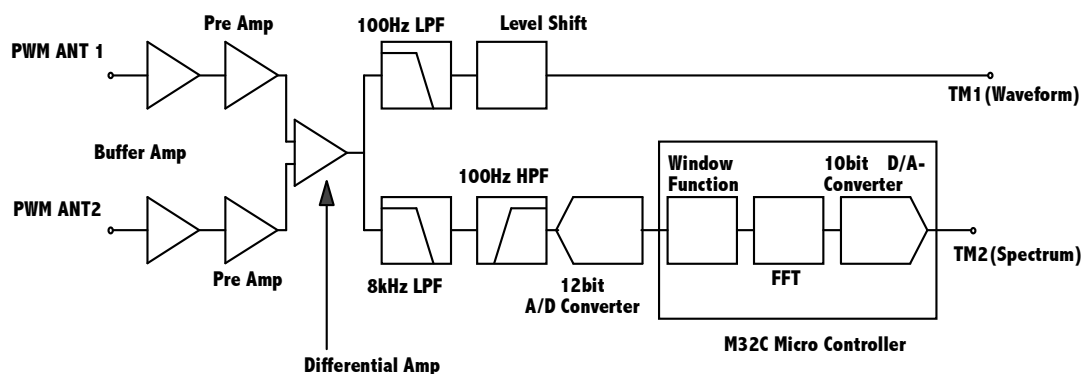


図3 PWM ブロックダイアグラム

4. 実験結果と解析

観測された波動（0～100 Hz 帯）のダイナミックスペクトルを図4に示す。図中に示された縦の筋状に見えるものは **TMA** 放出のタイミングと同期して観測されたバースト状の波動である。また、図5の電子密度の高度プロファイル（波動と同時観測）を参照すると、**Es** 層高度は105 km付近であるが、**PWM** では **Es** 層通過付近において特徴的な波動を検出している。

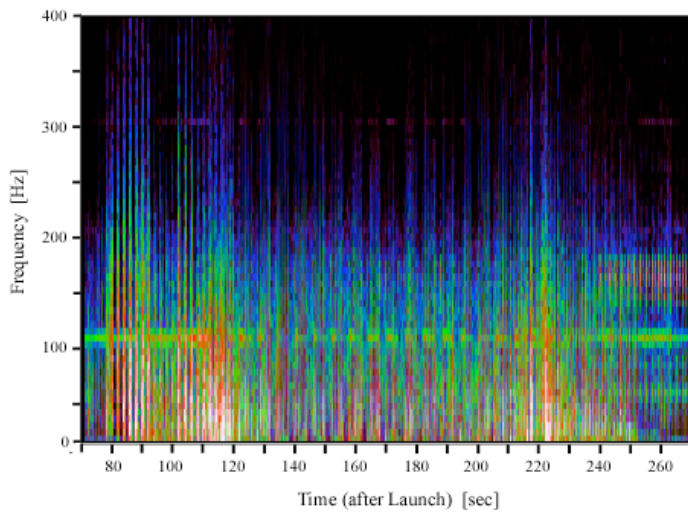


図4
0～100 Hz 帯の
ダイナミックスペクトル

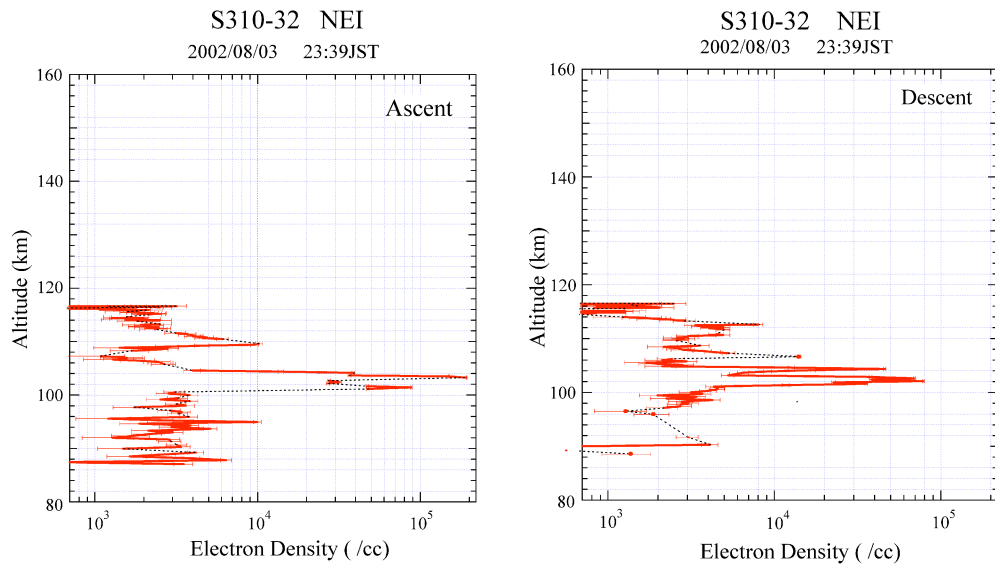


図5 NEIによる電子密度高度分布の観測結果
(左) 上昇時 (右) 下降時

観測された0～100Hzの波形を図6に示す。

今回の実験では、**TMA**によるノイズ発生タイミングとその周波数帯を明確にし、データから削除することでTMAとの干渉を回避しているが、思いがけずNEIからも干渉を受けており、**500msec**おきにスパイク状のノイズが生じていた。しかしノイズを除去した後も波動観測結果として使用可能であるだけのデータ量を確保している。

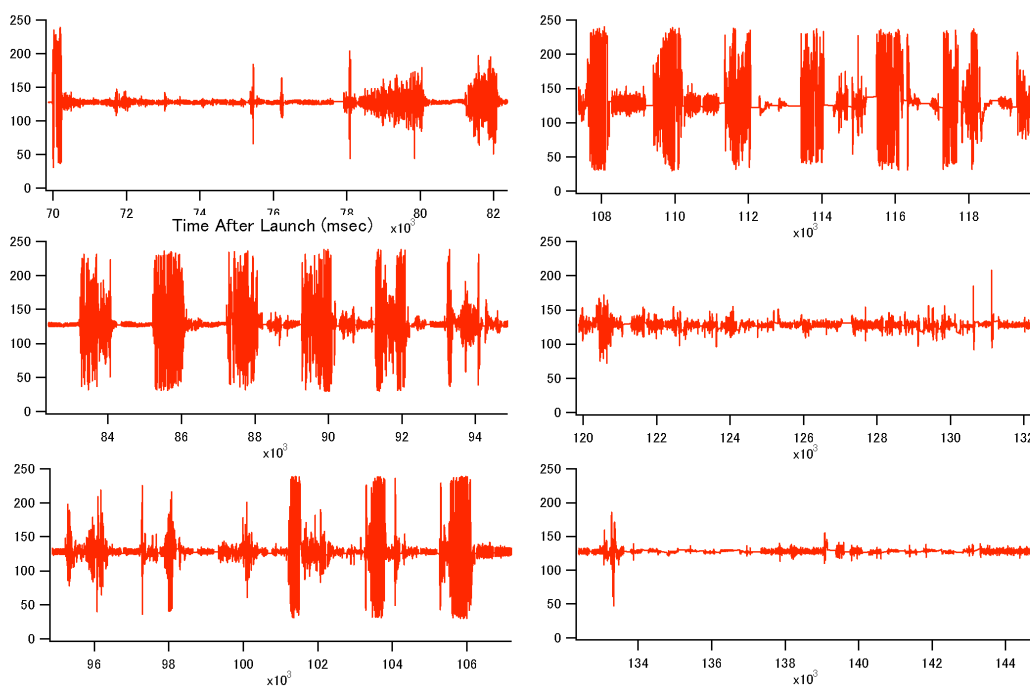


図6 0～100Hzでの生波形
バースト状に見えるものは**TMA**の放出による波動
Es層通過は約113～116秒である。

4-1 Es層通過に伴う波動の検証

ダイナミックスペクトル上で、上昇時のEs層を通過した直後及び下降時の1層目通過直後に生じていた波動は、**x+118s**と**x+222s**あたりで検出されている。その部分に着目し、詳細な検討を行う。

x+114-117s における**8192**ポイントを使用したFFT結果を図7に示す。

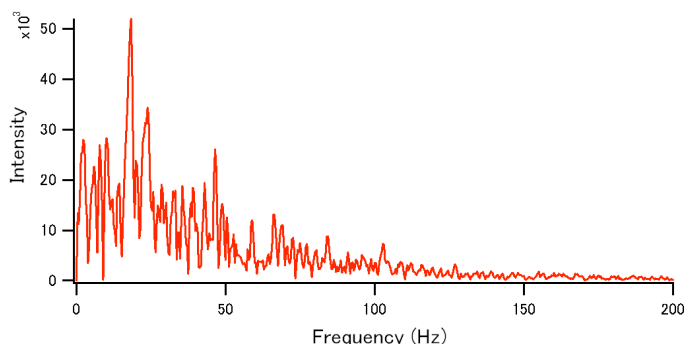


図7 **x+114-117s**の
FFT結果
18Hz, 23Hzに
高いピークが
見える。

FFTの結果により、18Hz及び23Hzにおいて波動がエンハンスしていることが見て取れる。一方でロケットの下降時に検出された **x+222s** 付近に着目し、そのFFT結果を示すと、図8のようになる。同様に波動がエンハンスされる傾向は見て取れるが、その周波数は上昇時ほど限定されず、共通のピークと認識できるのは19Hzのみである。この19~18Hzの波動がEs層高度に卓越する粒子のサイクロトロン周波数を示している可能性があるが、現時点ではその粒子種を特定するには至っていない。

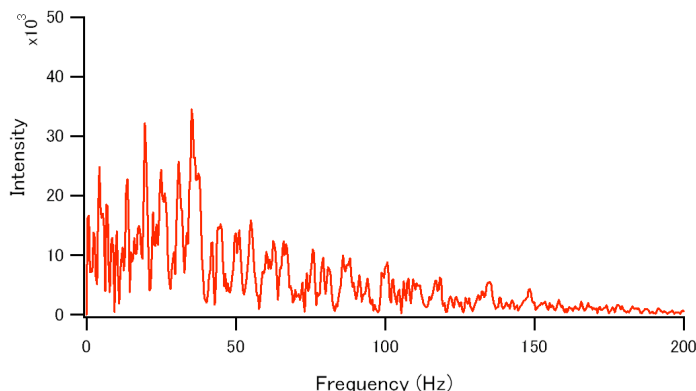


図8 **x+222s** 付近の
FFT結果

19Hz、35Hz に
ピークが見える

4-2 TMA噴射に伴う波動の検証

図6に見られる1秒間隔のバースト状の波動はTMAの噴射に同期して発生しているが、これがTMAの化学反応に関わる荷電粒子のサイクロトロン周波数を検出している可能性がある。TMAの噴射に同期した部分をFFTした結果を図9、10に示す。

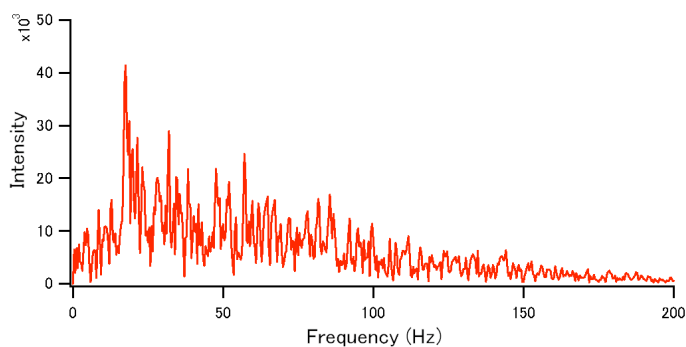


図9 **x+83-88s** の
TMAに同期した波動
のFFT結果

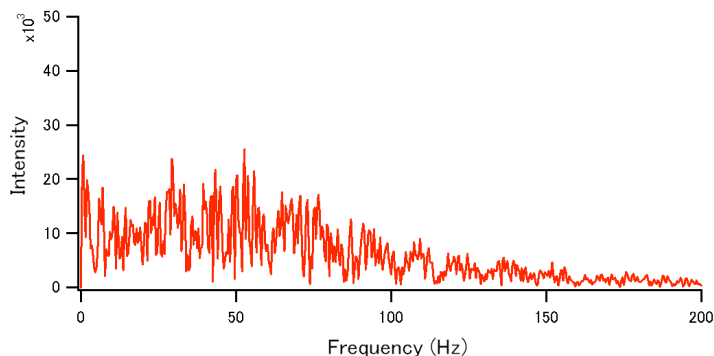


図10 **x+87-93s** の
TMAに同期した波動
のFFT結果

これらのスペクトルから、**x+83-88s** で 17 Hz 付近に波動がエンハンスしていることがわかる。しかしTMAの噴射の際には必ず出ているという根拠を得るには至っておらず、更なる解析が必要である。

5. まとめと今後の展望

SEEK-2 ロケット観測実験において、E s 層通過に伴う波動と、TMA噴射に伴う波動が観測され、現段階までの解析の結果から、E s 層通過については周波数帯 $18\sim 19\text{ Hz}$ のものであることが明らかになった。今後この波動の分散関係を解くことを目指し、観測された周波数帯でサイクロトロン周波数となる荷電粒子を特定する予定である。また、TMA噴射に伴う波動は 17 Hz にピークが存在するが、必ずしもTMAに起因するものであるかどうかは現段階では不明である。これについては波動に混在するノイズ成分をさらに処理した上で、あらためて解析を行う予定である。