

# WIND-II キャンペーンにおいて観測された電離圏電子密度及びプラズマ波動

遠藤 研, 小野 高幸, 熊本 篤志, 佐藤 由佳, 寺田 直樹, 加藤 雄人

東北大学大学院理学研究科

## 1. はじめに

地球の電離圏 E 領域、F 領域はプラズマと中性粒子が共存する領域である。中性粒子と異なりプラズマは電磁場により力を受け運動するので、両者は別々に運動しようとしながらも、衝突や電場を介して運動量を交換しながら複雑な運動をしていると考えられている。しかし、その運動量交換に関する観測的な検証はこれまであまりなされてこなかった。その理由は電離圏、特に F 領域における中性大気風速の観測技術が確立されていないからである。

現在考えられている F 領域での中性風観測方法の一つが、観測ロケットからリチウムを放出し、その共鳴散乱光を中性大気のトレーサーとして使用するものである。その世界初の試みとなる WIND-I (Wind measurement for Ionized and Neutral atmospheric Dynamics study -I) キャンペーンが 2007 年 9 月に内之浦宇宙空間観測所で行われ、既に中性風の観測に成功している[1]。

地上からの中性風観測とともにリチウム放出実験で重要な観測が、放出の影響による電離圏擾乱のその場観測である。リチウムの一部は太陽光の照射により電離すると考えられるため、プラズマの密度、温度などの基本諸量の観測はリチウム放出のモニターとしての役割を担う。このようなロケットによるプラズマのその場観測もまた WIND-I キャンペーンで行われており、その際に東北大グループはインピーダンスプローブとプラズマ波動受信機を搭載し、取得した電子密度及びプラズマ波動データはリチウムの放出を示す基本データとして非常に重要な役目を果たした。

そして今回、引き続きリチウム放出実験技術の確立を目的とし、2012 年 1 月 12 日に WIND-II キャンペーンが行われた。東北大グループは前回同様、インピーダンスプローブとプラズマ波動受信機を搭載し、リチウム放出前は背景の電離圏電子密度プロファイル、リチウム放出後は放出によって引き起こされる電離圏擾乱時の電子密度とプラズマ波動を測定した。今回はその初期解析結果を報告する。

## 2. 観測機器

インピーダンスプローブはプラズマ中のアンテナインピーダンスの共振周波数から絶対電子密度を高精度に測定する観測機器である[2, 3]。搭載したインピーダンスプローブの測定可能電子密度範囲は、ロケット上昇時は  $10^3 \sim 2 \times 10^6$  /cc、下降時は  $10^3 \sim 7 \times 10^6$  /cc とした。下降時に測定の上限を引き上げたのは、下降時に予定されていたリチウム放出に備えるためである。

プラズマ波動受信機は tip-to-tip が 5m のダイポールアンテナで測定した電場を FFT し、スペクトルを出力する方式をとった。測定の周波数帯域は MF 帯、VLF 帯の 2 帯域あり、MF 帯は 20 kHz~22.0 MHz、VLF 帯は 300 Hz~20.25 KHz とした。

両機とも時間分解能は 250 msec であり、これは高度分解能 ~500 m に相当する。WIND-I キャンペーンの時と比べ分解能は 2 倍向上したことになる。

### 3. 観測結果

ロケットの打ち上げは鹿児島県にある内之浦宇宙空間観測所で行われた。リチウムの共鳴散乱光を十分な S/N で観測するために、打ち上げは電離圏が日照し始める 5 時 51 分に実施された。リチウムの放出は下降時に 3 回 (X+401s、441s、459s) 予定されていた。ロケットは高度 298 km まで到達し、上昇時、下降時ともにインピーダンスプローブ及びプラズマ波動受信機は正常に動作した。

インピーダンスプローブのデータから求めた電子密度の高度プロファイルを図 1 に示す。

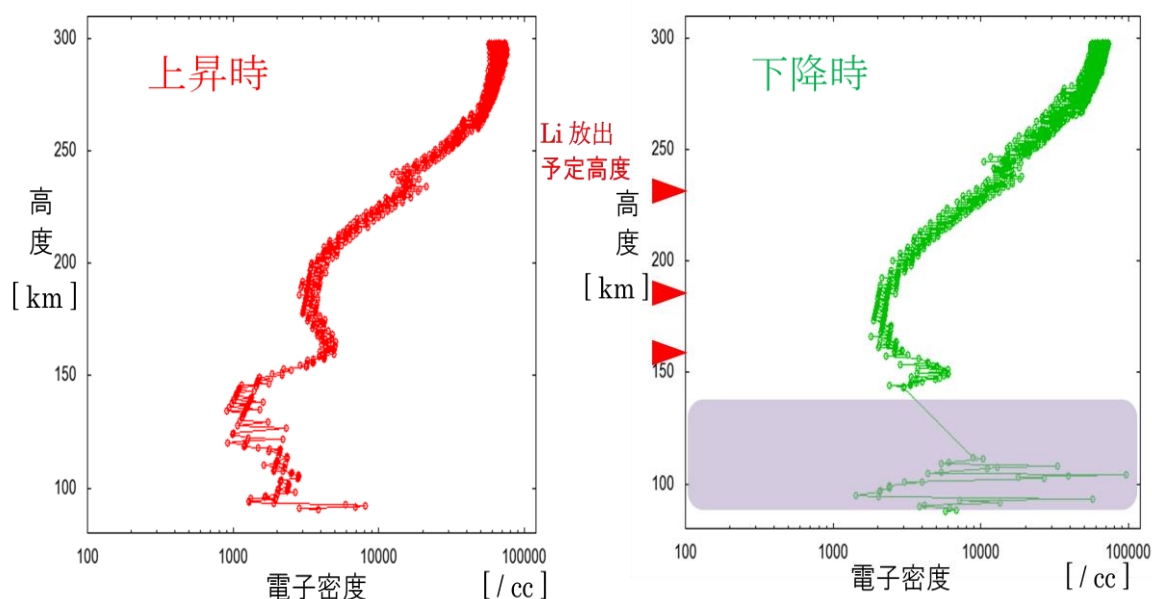


図 1. インピーダンスプローブのデータから求めた電子密度高度プロファイル。左がロケット上昇時、右が下降時のもの。下降時の 90~130 km の領域の網掛けは、データが乱れ、UHR 周波数が読み取りにくい又は読み取れない高度域を示す。

図 1 から伺える電子密度分布の主な特徴は、

- (1) 上昇時、高度 92 km、165 km に電子密度の極大点
- (2) 上昇時、高度 235~245 km に電子密度の不規則構造
- (3) 上昇時、高度~295 km で最大電子密度~ $7.6 \times 10^5 / \text{cc}$

- (4) 下降時、高度 245~250 km に電子密度の不規則構造
- (5) 下降時、高度 151 km に電子密度の極大点
- (6) 下降時、高度約 141 km 以下(X+469s 以降)でリチウム放出の影響と見られる波形の乱れ、及び電子密度の増加

である。

次に、プラズマ波動受信機によって得られた電場の交流成分の全飛行時間にわたるダイナミックスペクトルを図 2 に示す。ただし、図 2 は pixel 上の関係で、幾らか間引きされたものとなっている。

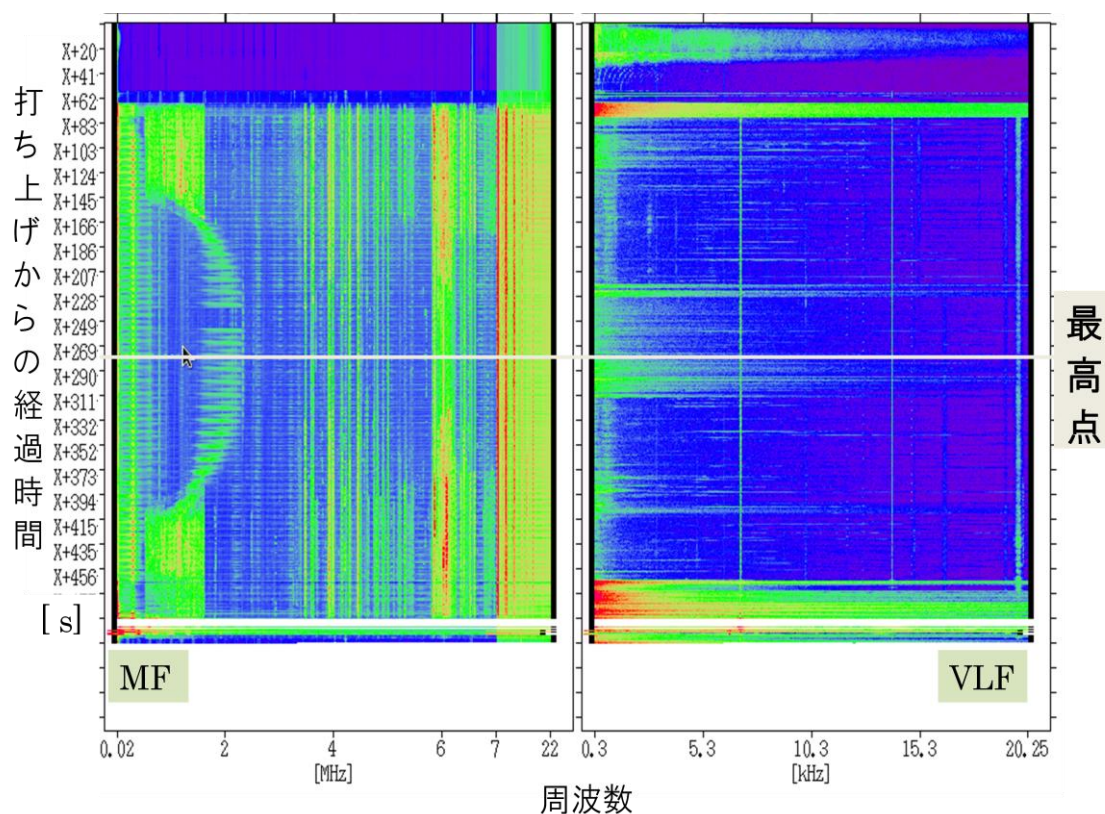


図 2. プラズマ波動受信機により得られたダイナミックスペクトル。左図が MF 帯、右図が VLF 帯のものを示している。縦軸が打ち上げ (X 時刻) からの時間、横軸が周波数を表す。横軸の目盛りが一部等間隔でない箇所があるのは、計測の周波数分解能の違いによるもの。色は波動強度を示し、暖色ほど強度が高いことを表している。

今回は、特徴的な波動についてのみ着目し詳細を見るため、X+120s~260s 及び X+360s~500s のダイナミックスペクトルを拡大したものを、それぞれ図 3、4 に示す。これらは間引きの無いデータである。

上昇時高度

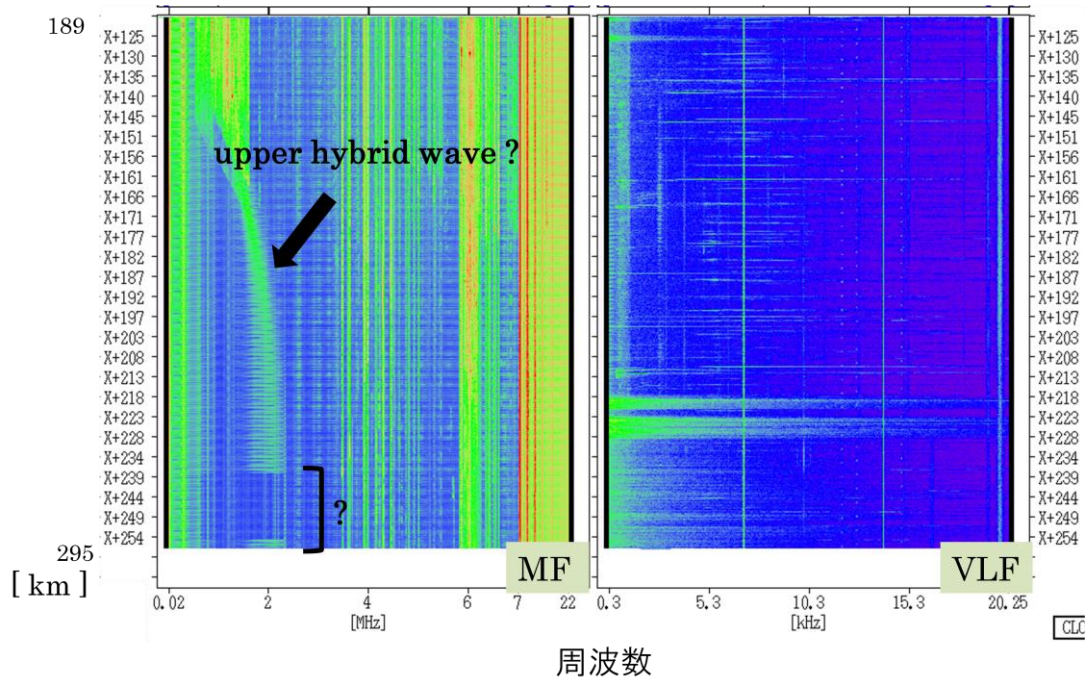


図 3. プラズマ波動受信機から得られたダイナミックスペクトル (X+120s~260s)

下降時高度

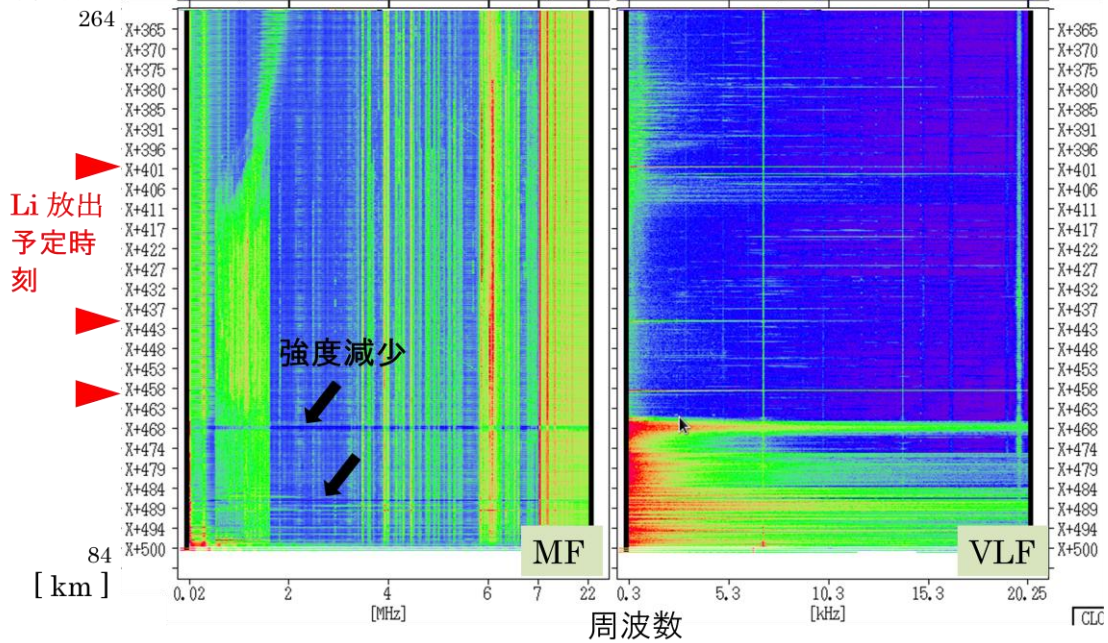


図 4. プラズマ波動受信機から得られたダイナミックスペクトル (X+360s~500s)

図 2~4 について、MF 帯に現れた特徴のうち目立ったものを挙げると、

- (1) X+160s~400s(高度約 240 km 以上)において、約 1.3~2.5 MHz に upper hybrid wave [e.g., 4]と見られる波動を観測。
- (2) (1)の波動は Wake の影響と思われる周期的な強度・周波数変動を伴う。
- (3) (1)の波動は X+239s~256s に消失。
- (4) X+469s (下降時、高度 140 km) 及び X+488s (下降時、高度 107 km) で波動強度の低下。

#### 4. 議論

打ち上げ当初の予定では、リチウム放出は下降時に3回行われる予定であった。しかし、インピーダンスプローブやプラズマ波動受信機が示すロケット下降時のデータのうち、上昇時と大きく異なる部分は X+469s 以降 (高度 141 km 以下) であることから、実際には 1 回目と 2 回目の放出は行われず、3 回目に予定されていた放出のみ実行された可能性が高い。X+469s において受信機で観測された波動強度の低下は、放出によるプラズマ密度の増加を示唆しているが、同時刻のインピーダンスプローブでは UHR 周波数を検出できておらず、波形の乱れとして影響が現れているのみである。これは、インピーダンスプローブの測定可能電子密度を超えた可能性を示す結果であるが、今後詳細な検討を要する事項である。

#### 5. まとめ

熱圏中性大気と電離圏プラズマの結合過程の解明を目的とした地上-ロケット総合観測、WIND-II キャンペーンにおいて、東北大学のグループは、観測ロケット S-520-26 号機にインピーダンスプローブとプラズマ波動受信機を搭載し、両機とも測定開始から着水まで正常に動作し続けた。インピーダンスプローブの測定結果から、ロケット上昇時は高度 92km、165km、下降時は 151km で電子密度が極大となる領域が存在していたこと、高度 240~250 km に不規則構造が形成されていたことなどが明らかになった。一方、プラズマ波動受信機は高度約 240km 以上で upper hybrid wave と見られる波動を観測した。上空でのリチウム放出は 3 回予定されていたが、放出の影響と考えられる電子密度増加、及びプラズマ波動強度の減少は、3 回目の放出予定時刻の約 10 秒後と約 29 秒後にのみ観測された。そのうち、約 10 秒後の電子密度増加はインピーダンスプローブの測定可能範囲を超えていたためか、UHR 周波数を検出することができなかった。

今後は、VLF 帯で観測された波動も含め、より詳細な解析を進めていく予定である。

#### 参考文献

- [1] 山田 “WIND ロケット実験における Li 共鳴散乱光の絶対発光強度測定に基づくガス化 Li 放出量の推定”, 特別研究報告, 高知工科大学, 2010
- [2] Balmain, K. G. The impedance of a short dipole antenna in a magnetoplasma,

*IEEE Trans. Ant. Prop.*, AP-12, 5, AP-12, 605, 1964

- [3] Oya, H., and T. Obayashi, Measurement of ionospheric electron density by a gyro-plasma probe: A rocket experiment by a new impedance probe, *Rep. Ionos. Space Res. Japan*, 20, 199, 1966
- [4] Suzuki, T., On the impedance probe measurements in space plasmas, Ph. D. thesis, Tohoku University, 2011