

ウェイクに起因する観測ロケット近傍のプラズマ波動に関する研究 及び新型高時間分解能インピーダンスプローブの実験

遠藤 研、熊本 篤志、小野 高幸

東北大学大学院理学研究科

1. ロケットのウェイクに伴うプラズマ波動

観測ロケットは周囲の電離圏プラズマと相互作用しながら飛翔する。ロケットが引き起こすプラズマ擾乱として代表的なものの一つがウェイクと呼ばれる領域の形成である。これはロケットの後方にできるプラズマ密度の低い領域のことを指す。ウェイクの存在は観測データに影響を及ぼすため、重要な課題として古くから研究が行われてきた[e.g. 1]。

近年のロケット観測により、ロケットのウェイクが MHz 帯のプラズマ波動を励起する可能性が指摘されている[2]。この問題に対してはこれまでにコールドプラズマ近似の理論に基づく解析が行われ、波のモードが高域混成共鳴(UHR)モードであることや、ウェイクの両端から流入する電子が二流体不安定を引き起こし、波動を励起するというモデルが提案されている[2]。

しかし、[2]で観測された一部の波の周波数帯は、電子密度の観測値から予想される UHR モードの分散関係に合わず、この点は未解決の課題として残されている。また、これまでの研究で使用された波動受信機の最高時間分解能は 500 msec にとどまり、波の励起メカニズムや励起領域を議論する上で十分なものではないという問題があった。

そこで、本研究では、2012 年 1 月 12 日 5 時 51 分に鹿児島県内之浦で打ち上げられた観測ロケット S-520-26 号機にインピーダンスプローブ (NEI) 及びプラズマ波動受信機 (PWM) を搭載し、電子密度及び電場の AC 成分の観測を行うことで、ロケットのウェイクに伴うプラズマ波動に関して再度考察することを試みた。両観測機器の時間分解能は約 260 msec で、これはロケット 1 スピンに 4~5 回の測定を行うことを可能にしている。

2. S-520-26 号機実験と観測結果

ロケットの打ち上げ (時刻 X) 後 100~460 sec における PWM の観測結果を図 1 に示す。図 1 上には、IGRF 地球磁場モデル[3]及び NEI の観測結果を用いて導出したプラズマの特性周波数を上書きしてある。本実験により、過去の観測[2]で指摘された波動と同様の 1.3~2.4 MHz 帯の波 (MF 帯の波) の他、0.9 MHz 以下にも波動 (LF 帯の波) を観測することに成功した。MF 帯の波動に関しては、低高度ではおよそプラズマ周波数 f_p から UHR 周波数 f_{UHR} の帯域で波が観測されているが、高高度ではスペクトルの下限が f_p よりも下まで伸びてい

ることが分かる。

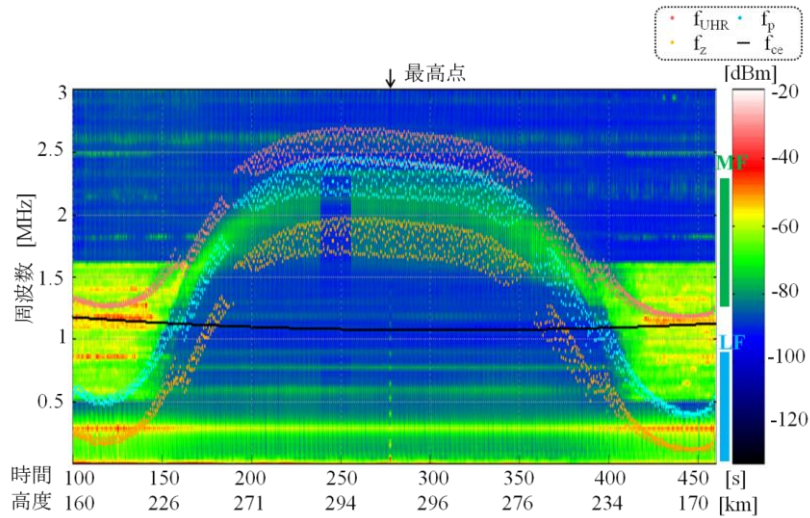


図1 PWMにより得られたダイナミックスペクトル (X+100~X+460 sec)

次に、同時搭載した磁力計 (MGF) 及び太陽センサ (SAS) のデータを利用して、ロケットの絶対姿勢を求め、各アンテナのspin位相角を導出した。但しここで、spin位相角は図2に示すように定義し、アンテナがロケットの進行方向を向いている際のspin位相角を 0° 、ロケットのspinの向きに増加するものとする。電子密度、プラズマ波動のspin位相角依存性の例を図2に示す。図2は時刻 X+325~330 sec に得られた観測データをまとめたものである。

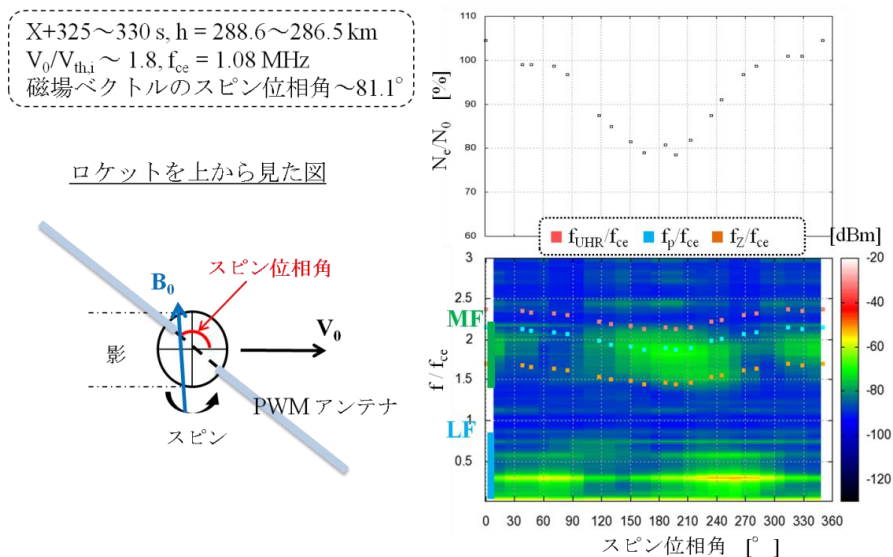


図2 スピン位相角の定義 (左) と観測データのspin位相角依存性 (右)

図2から、MF帯の波はウェイクの構造に対しておよそ平行にアンテナが伸びているときに強く観測されていることが分かる。波の周波数上限はおよそウェイク中心におけるUHR

周波数であるが、下限はプラズマ周波数を大きく下回っている。一方、LF 帯の波もスピニ位相角依存性を持ち、その周波数帯域は電子サイクロトン周波数 f_{ce} 以下となっている。

3. 考察

以下では、観測された波動がロケットのウェイク周辺で励起したものと仮定し、ホットプラズマの理論に基づき波動のモードに関して考察を行う。

ロケットのウェイクのスケール長を 0.4~1.2 m と見積もると、ウェイクに起因して励起するプラズマ波動の波長はそれ以下と考えられる。したがって、ホットプラズマの分散関係 (図 3) と対応付けを行うと、観測された波動は短波長の静電波であることが分かる。MF 帯の波動は UHR モード波動及び静電的電子サイクロトン高調波 (ESCH 波)、LF 帯の波動はホイッスラーモード波動に対応している。

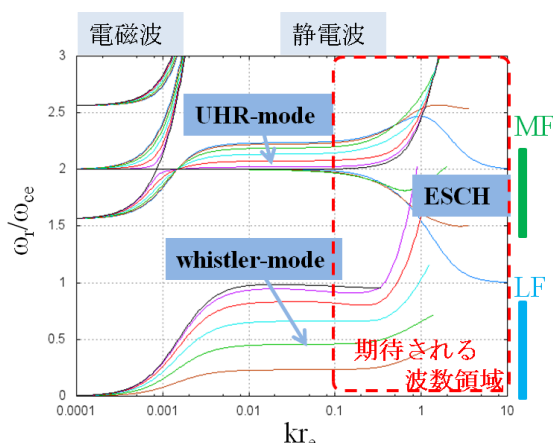


図3 ホットプラズマ ($f_p/f_{ce}=2$, $T_e=1610$ K, $r_e \sim 2$ cm) における ω - k ダイアグラム (図 2 と同じプラズマ条件。電子温度は IRI2007 モデル[4]を使用。)

さらに、Stix(1962)[5]の方法に従いブラソフ-マクスウェル方程式を線形化して解くことで、電子の速度分布関数に電子ビームや温度異方性を与えたときに、静電波のモードが成長率をもつかどうか検討を行なった。代表的な場合として、以下の条件

- (A) 電子ビーム (ビーム速度が電子熱速度の 10 倍で、ビーム成分の割合が全電子の 1%) を与えた場合
- (B) 全電子に温度異方性 ($T_{\perp}T_{\parallel}=100$) を与えた場合

で数値計算を行なった結果、いずれの場合も、観測された波動に近い周波数帯域か

つ短波長の波長域で線形成長率を持つことが明らかになった。

4. 新型高時間分解能インピーダンスプローブの実験

S-520-26 号機ロケット実験を含め、NEI はこれまで数々の観測ロケットに搭載され、実績を上げてきた。しかし、NEI は電子密度の絶対値を高精度に求められるという利点があるものの、時間分解能という点では未だ改善の余地がある。そこで、東北大グループは、電離圏電子密度やウェイクの構造を高精度かつ詳細に計測することを目的として、新方式の NEI の開発を進めている。

NEI は、プラズマに伸展したアンテナの周波数特性を得ることでプラズマの UHR 周波数を計測する観測機器である。従来、周波数特性を得る方法として用いられてきたものは、印加交流電圧の周波数を掃引する周波数掃引式である。これに対し、現在開発を進めている NEI は、白色雑音を印加し出力波形をフーリエ変換することにより周波数特性を得る白色雑音印加式 NEI である。白色雑音印加式は周波数掃引式に比べ、時間分解能や信号雑音 (S/N) 比を柔軟に変更しやすく、NEI の高時間分解能化に適していると考えられる。

東北大グループは、FPGA を用いて白色雑音の生成や周波数解析等を行うよう新方式 NEI を設計・開発した。その後、2012 年 12 月に宇宙科学研究所の大型スペースサイエンスチェンバを用いて、新方式 NEI のプラズマ内動作試験を行い、

- ・新方式 NEI がチェンバ内で独立した装置として機能すること
- ・乱数から生成する印加信号が、必要な周波数帯域で白色雑音になっていること
- ・十分な精度で電子密度の計測を行うことが可能なこと

を確認した。

さらに、同実験では、従来型 NEI (周波数掃引式; 時間分解能 250 msec) と新型 NEI (白色雑音印加式; 時間分解能 16 msec) のデータ比較も行なった。チェンバ内にプラズマを生成後、磁場を 0 nT から 70000 nT に急変させる実験を行った時のデータを図 4 に示す。図 4 は出力電圧の周波数特性の時間変化を表しており、最も寒色を示している周波数が、各時刻の UHR 周波数

である。どちらの NEI も磁場の急変による UHR 周波数の変化を捉えているが、新型 NEI の出力周波数特性はその後 12 Hz で変動していることが分かる。これは磁場が変化したことによりチェンバ内の

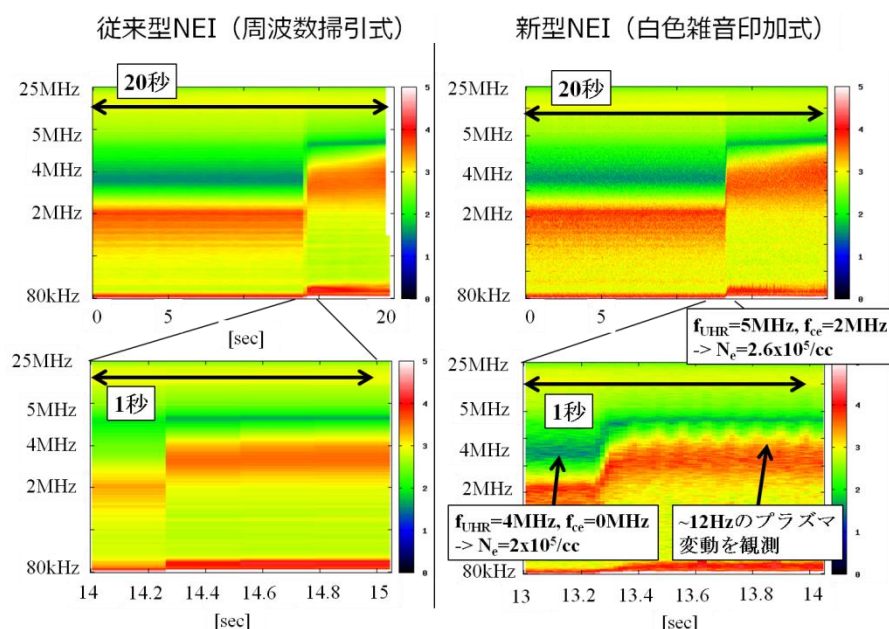


図 4 従来型 NEI と新型 NEI のデータ比較

プラズマが乱され、12Hz の周期で状態が変動していることを示しており、新型 NEI によって初めて捉えることができた現象である。

5. まとめと今後の予定

S-520-26 ロケットに搭載された NEI・PWM の観測結果から、ロケット周辺に形成されるウェイクの電子密度分布とプラズマ波動のスペクトル分布の関係が明らかになった。観測されたプラズマ波動がウェイクに起因するものであると仮定すると、ホットプラズマ理論に基づく考察から、それらは静電的な UHR モード波動、ESCH 波、ホイッスラーモード波動であるという可能性が浮上した。

今回観測されたプラズマ波動のスピニ位相角依存性は、プラズマ不安定の領域がウェイク構造に対し局在していることを表している可能性がある。今後は、様々な速度分布関数を仮定して線形成長率を計算し、プラズマ波動の観測結果と詳細に照らし合わせることで、ロケットのウェイク周辺での波動励起モデルを検討する予定である。

また、東北大グループは白色雑音印加方式の NEI を開発し、2012 年 12 月に大型スペースチェンバを用いて動作試験を行なった。その結果、白色雑音印加式 NEI が

- (1) チェンバ内で独立した装置として電子密度を計測可能なこと
- (2) 従来型 NEI では計測できなかった 12Hz のプラズマ変動を計測可能なこと

が示された。

来年度は、チェンバ内の様々な場所を様々な条件で計測し、チェンバ内の電子密度の非一様性・時間変動を計測する実験を行うことで、新型 NEI の性能の評価を実施する予定である。

謝辞

本研究で使用した MGF 及び SAS のデータは高橋隆男教授（東海大）、菅井正俊氏（東海大）によりご提供いただいた。白色雑音印加型 NEI 及び S-520-26 号機に搭載した NEI/PWM の実験は、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所の共同利用施設であるスペースサイエンスチェンバを用いて行われた。また、NEI・PWM の開発・試験は、株式会社システム計測のご協力のもと行われている。関係する皆様に改めて感謝の意を表明したい。

参考文献

- [1] Al’pert, Ya. L. et al., Consultants Bureau, New York (1965)
- [2] Yamamoto, M.-Y., PhD. Thesis, Tohoku University (2000)
- [3] IAGA Working Group V-MOD, *Geophys. J. Int.* **183** (2010), 1216-1230
- [4] Bilitza, D. and B. W. Reinisch, *Adv. Space Res.*, **42** (2008), 599-609
- [5] Stix, T. H., McGraw-Hill, New York (1962)