

S-310-40 搭載 NEI・S-520-26 搭載 NEI/PWM の試験、観測結果、及び白色雑音を用いた新型 NEI の検討

遠藤 研, 小野 高幸, 熊本 篤志, 佐藤 由佳, 加藤 雄人, 寺田 直樹
東北大学大学院理学研究科

1. はじめに

インピーダンスプローブ (NEI; Number density of Electrons by Impedance probe) 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電子密度の絶対値を高精度に測定する観測機器である[1, 2]。図 1 は、プラズマ中におけるプローブ等価容量の振幅・位相成分の理論計算値[3]であり、UHR 周波数において、振幅成分は極小値をとり、位相成分は -180° から 0° へと変化する性質をもつ。NEI はこの性質を利用してプラズマの UHR 周波数を同定することで電子密度を導出する機器である。

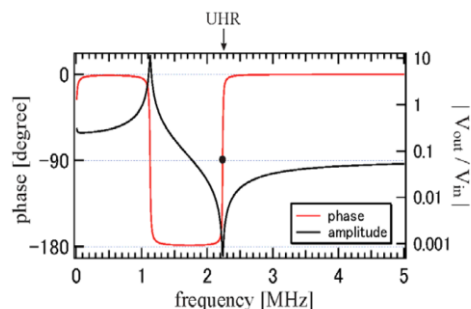


図 1. プラズマ中におけるプローブ等価容量の振幅・位相成分の理論計算[3]

東北大グループは 2011 年度実施のロケット実験に向けて、FPGA を用いた NEI 及びプラズマ波動受信機 (PWM; Plasma Wave Monitor) のデジタル化に取り組んできた[3]。本稿では、2011 年度に宇宙科学研究所の大型スペースチェンバーを利用した、観測ロケット S-310-40 搭載用 NEI 及び S-520-26 搭載用 NEI/PWM のプラズマ内動作環境試験の結果、及び 2 つのロケット実験の観測結果、そして白色雑音を用いた新型 NEI の開発検討結果について報告する。

2. 真空チェンバー実験

S-520-26 号機搭載用の NEI/PWM が真空中やプラズマ中で正常に動作するかどうかを確認するため、2011 年 5 月 30 日から 6 月 3 日に宇宙科学研究所の大型スペースチェンバーを用いた環境試験を行った。図 2 は、その際のチェンバー内の様子である。図のようにチェンバー内に搭載用 NEI/PWM と参照用のアナログ NEI を配置し、搭載用 NEI についてはアナログ NEI とデータを比較し、搭載用 PWM については誤動作が起こらないかどうかのみを確認した。

実験の結果、搭載用 NEI は図 3 のようにプラズマ中で正しく動作することが示された。アナログ NEI の示す値に比較して、系統的に大きな UHR 周波数が得られたが、チェンバー内のプラズマの不均一性を考えれば妥当な結果と判断した。また、搭載用 PWM に関しても正常な動作を確認することができた。

また、2011年9月16日から9月22日には、同様に大型チェンバーを用いた S-310-40 号機搭載用 NEI の真空中ならびにプラズマ中での動作環境試験を行った。その結果、アナログ NEI の示す結果と矛盾ない出力が確認され、動作は正常と判断された。

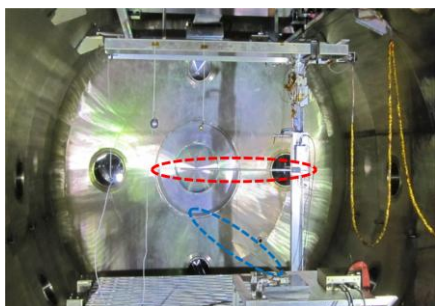


図 2. 2011年5月30日から6月3日
実験時のチェンバー内の様子。
赤丸がアナログ NEI、青丸が搭
載用 NEI のプローブ。

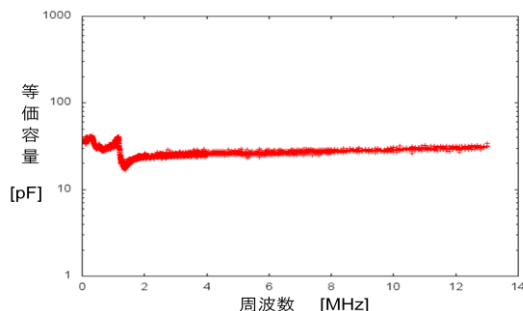


図 3. S-520-26 搭載用 NEI によって得ら
れた等価容量曲線。

3. S-310-40、S-520-26 号機ロケット実験

観測ロケット S-310-40 号機は、冬季夜間に起こる電波の異常伝搬の原因を解明することを目的として、2011年12月19日23時48分に鹿児島県・内之浦宇宙空間観測所から打ち上げられた。NEI は高度 93 km から最高到達高度 180 km にわたり、プローブ等価容量の振幅及び位相の計測に成功した。図 4 に示すように、振幅のデータから UHR 周波数を読み取ることで電子密度の高度プロファイルが得られている。

一方、観測ロケット S-520-26 号機は、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て、2012年1月12日5時51分に同じく内之浦宇宙空間観測所から打ち上げられた。NEI/PWM は高度 88 km から最高到達高度 298 km にわたり、正常に動作を続けた。NEI のデータから求めた電子密度プロファイルと、PWM のダイナミックスペクトルをそれぞれ図 5、6 に示す。

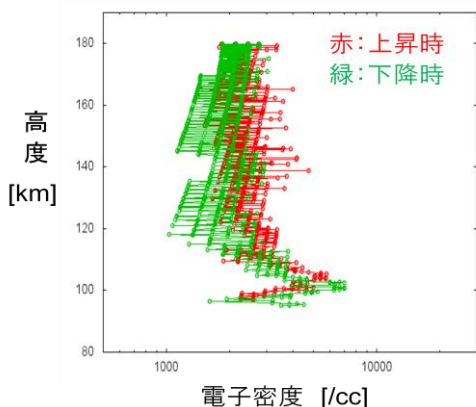


図 4. S-310-40NEI によって得られた
電子密度プロファイル。

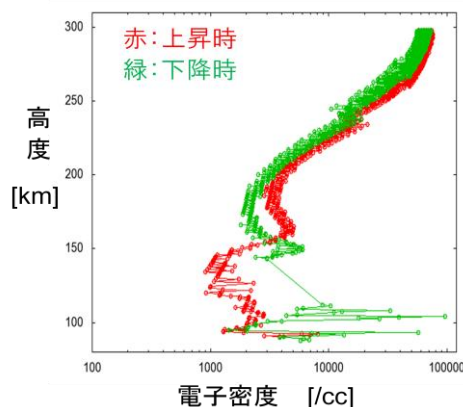


図 5. S-520-26NEI によって得られた
電子密度プロファイル。

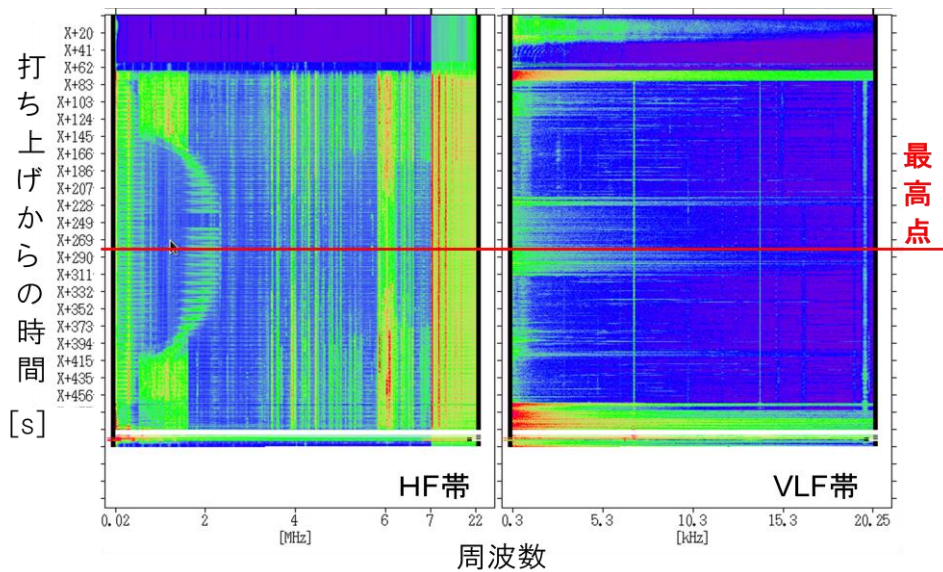


図 6. S-520-26PWM によって得られたダイナミックスペクトル。色は強度を表し、暖色ほど高い。データは間引きされている。

4. 白色雑音印加型インピーダンスプローブ

S-310-40、S-520-26 号機に搭載した NEI も含め、従来の NEI の測定方法は周波数掃引型であり、印加信号の周波数を掃引することによってプローブ等価容量の周波数特性を得る方法が採られている。FPGA を用いたデジタル化によって得られる最良の測定時間分解能は約 60 msec [3]であるので、これは観測ロケットの場合高度分解能にして約 120 m に相当する。しかし、現在提唱されている様々な電離圏擾乱のうち、スケールの小さいものは数 m 程度とされており [4]、従来の NEI の時間分解能ではその存在を捉える事ができない。

そこで、東北大グループは NEI の時間分解能向上を目的として、白色雑音を印加して応答信号を FFT することにより等価容量の周波数特性を得る、白色雑音印加型 NEI の開発を検討している。2011 年 9 月 17 日のチェンバー実験では、白色雑音印加型 NEI で実際にプローブの共振特性を得られるかどうかについての実証実験を行った。

実験では、参照用のアナログ NEI に SG で 2Vp-p の白色雑音を印加し、その応答信号の波形を 50 MHz でサンプリング、その後データを 8192 pt で FFT しスペクトルを得た。得られたスペクトルの、入力信号スペクトルに対する比をグラフ化したものを図 7 (a) に示す。図 7 (a) より、白色雑音を印加する方法で等価容量の共振特性が得られることが確かめられた。さらに、S/N を良くするために、複数のスペクトル比を平均した例を図 7(b)~(d)に示す。平均回数を上げることにより S/N が改善され、従来の周波数掃引型に劣らない精度で UHR 周波数を検出できることが示された。

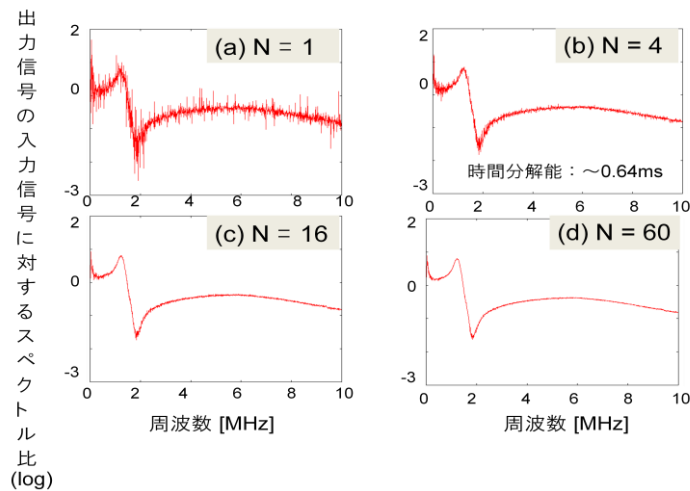


図 7. 白色雑音印加により得られた出力信号スペクトルの、印加信号スペクトルに対する比。N は平均回数を表す。

5. まとめ

宇宙科学研究所の大型スペースチェンバーを用いて、観測ロケット S-310-40 搭載用 NEI 及び S-520-26 搭載用 NEI/PWM の動作確認試験を行った。チェンバー実験ではいずれも真空中ならびにプラズマ中で正常に動作し、所定の性能が達成できていることを確認できた。これらの観測機器は 2011 年 12 月から 2012 年 1 月にかけて実施された観測ロケットに搭載され、電離圏プラズマ環境の測定に成功している。

また、真空チェンバー実験では、並行して白色雑音印加型 NEI の開発検討を行った。その結果、一定回数の平均処理を行うことにより、従来の周波数掃引型 NEI の測定精度に劣らない S/N を得られることが示された。

来年度の実験では、今回の実験結果をもとに更なる白色雑音印加型 NEI の開発検討を進めるとともに、S-520-27 搭載用 NEI のプラズマ内動作環境試験を行う予定である。

参考文献

- [1] Balmain, K. G. The impedance of a short dipole antenna in a magnetoplasma, *IEEE Trans. Ant. Prop.*, AP-12, 5, AP-12, 605, 1964
- [2] 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
- [3] Suzuki, T., On the impedance probe measurements in space plasmas, Ph. D. thesis, Tohoku University, 2011
- [4] Yamamoto, M., Fukao, S., Woodman, R. F., Ogawa T., TsuJ. *Geophys. Resda* T. and Kato, S.: Mid-Latitude E Region Field-Aligned Irregularities Observed With the MU Radar,.. 96(A9), 15943-15949, 1991