

S-310-46 号機搭載用白色雑音印加型インピーダンスプローブのプラズマ計測実験

熊本 篤志 (東北大)

Plasma measurement test of the white-noise-type impedance probe for the sounding rocket S-310-46

A. Kumamoto (Tohoku Univ.)

1. はじめに

インピーダンスプローブ(Number density measurement of Electron by Impedance probe; NEI)は、電離圏プラズマ中に伸展したプローブの電気容量が高域混成共鳴 (Upper Hybrid Resonance; UHR) 周波数で極小となることを利用してロケット近傍の電子密度を精密に計測する観測装置である[1,2]. 従来の NEI では、0.125 秒の間に、プローブに印加する正弦波信号の周波数を 0.1~20MHz の帯域内で、400 回に分けて変化させることによって、プローブ容量の極小を探すので、観測地点1点の電子密度を得るのに 0.125 秒を要した. 観測ロケットは鉛直方向に数 km/s の速度で進むので、空間分解能は数 100m 程度となり、スホラディック E 層のような微細な電離圏構造の観測では、空間分解能が不足する. そこで夏季日中に出現するスホラディックE層観測を目的とする S-310-46 号機搭載用 NEI では、掃引周期の短縮(125ms→62.5ms)に加えて、将来の更なる分解能向上に向けて、試験的に白色雑音を印加する計測モードの追加を行った. S-310-46 号機搭載用 NEI のフライトモデル開発は 2023 年度に進められ、2024 年 2 月には単体での機能・性能確認、振動・衝撃、温度等の環境試験を完了した. さらに、単体での最終的な性能確認と真空試験を兼ねて、2024 年 3 月に、JAXA 宇宙科学研究所スペースサイエンスチェンバを利用して、プラズマ計測試験を行った. 本稿ではプラズマ計測試験の結果を報告する.

これまで NEI は、いくつかの科学衛星と多数の電離圏観測ロケットに搭載されてきたが、近年、小型・超小型衛星の利用拡大によって、マイクロ波無線送電実証衛星「OHISAMA (On-orbit experiment of High-precision beam control using small SATellite for MicrowAve power)」や放射線帯観測超小型衛星「PCUBE (Probing, Controlling, and Understanding of Radiation Belt Environments)」などのように小型・超小型衛星への搭載も求められるようになってきている. 観測ロケット用 NEI を 1U(10×10×10cm³)まで小型化していく上で、削減を図りたい構成要素の1つとして、容量ブリッジの容量バランス調整用ダミーケーブルが挙げられる. 容量ブリッジの等価回路、写真を図 1, 2 に示す. ダミーケーブル(同軸, 1.5D2V)は容量ブリッジのセンサー側と反対側に取り付けられ、プローブ本体を除くセンサー筐体・ハーネス部分の容量を相殺する. 容量ブリッジには粗く容量バランスを調整するために C₂ が可変コンデンサになっているのに加えて、このダミーケーブルが取り付けられており、1pF/cm の目安でカットしていくことで容量バランスの微調整を可能とする. したがって、ダミーケーブルと置き換えられるものは、サイズが小型、容量が 100pF 前後で可変で、かつ 0.3pF 程度の精度で微調整もできなければならない. 本稿ではダミーケーブルをバラクタダイオード回路で置き換えた機

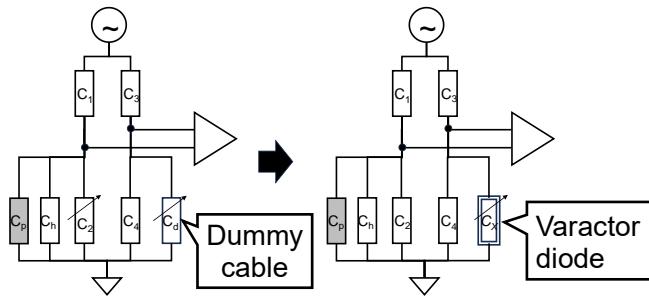


図 1. NEI 容量ブリッジ等価回路. 容量ブリッジにはプローブ容量(C_p)に加えてセンサー筐体・ハーネス容量(C_h), ダミーケーブル容量(C_d)が加わる. プローブ以外の容量(白)がバランスするように可変コンデンサ容量(C_2)を粗調整, ダミーケーブル容量(C_d)を微調整する. 小型化に向けて C_d を小型化・容量微調整が可能な C_x に置き換えたい.

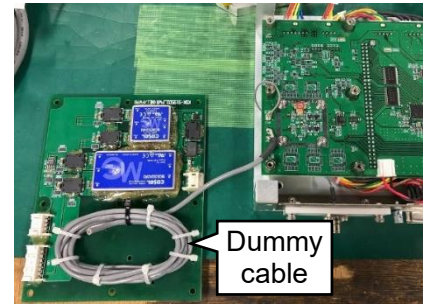


図 2. NEI ダミーケーブル. 電子回路部の全基板(2枚)の面積の 1/4 を占有

上調整型 NEI (Onboard-Tunable NEI; OT-NEI) を提案し, 2024 年 3 月の実験で併せて実施した OT-NEI 試作機のプラズマ計測実験の結果についても報告する.

2. S-310-46 用白色雑音印加型 NEI によるプラズマ計測実験

JAXA 宇宙科学研究所・相模原キャンパスの大型スペースサイエンスチェンバを利用して, 2024 年 3 月 25~29 日に S-310-46 号機搭載用 NEI のプラズマ計測試験を行った. 図 3,4 に S-310-46 用 NEI の機器ブロック図, プラズマ計測試験での設置状況を示す. 容量ブリッジに印加する信号は FPGA と DAC によって生成された周波数掃引正弦波とアナログ回路の白色雑音源が切り替えられるようになっており, S-310-46 号機の実験では, 周波数掃引計測と白色雑音印加計測を 62.5ms 毎に交互に切り替えて実施する. S-310-46 号機の飛行実験で電離圏の観測でも, 白色雑音印加方式で問題ないことが確かめられれば, 将来的には白色雑音印加方式に一本化し, 十分な S/N で計測が可能な時間分解能の限界を探っていく方針である. 図 5 に S-310-46 用 NEI で得られたプラズマ計測データの例を示す. この時, チェンバ内では, 大型紫外光源でプロピレンガスを電離してプラズマが生成されていた. データ先頭マーカの電圧レベルが計測方式を示しており, 前半の 62.5ms は, Ch1 が周波数掃引方式で計測されたプローブ容量, Ch2 が印加信号-容量ブリッジ出力の位相差, 後半の 62.5ms は, 白色雑音印加方式で計測されたプローブ容量で Ch1 が 0~30MHz の範囲, Ch2 が 0~4MHz の範囲を示している. UHR 周波数を示すプローブ容量極小が, 実績のある周波数掃引計測だけでなく, 白色雑音印加計測でも確認できる. UHR 周波数はいずれも 2.84MHz で, 同時にチェンバ内に設置した複数のインピーダンスプローブ BBM での計測値とも一致した. 相模原の磁場が 46848nT, 電子サイクロトロン周波数が 1.31MHz なので, プラズマ周波数は 2.51MHz, 電子数

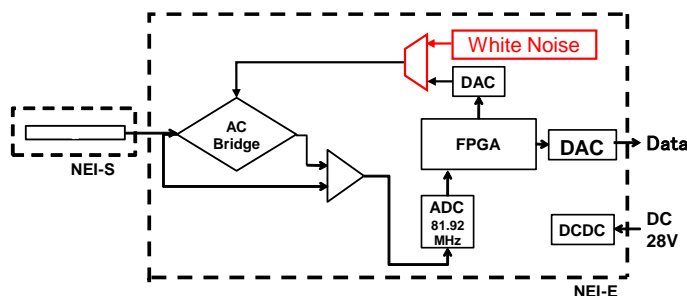


図 3. S-310-46 用 NEI のブロック図. 容量ブリッジ印加信号入力に白色雑音生成部を追加

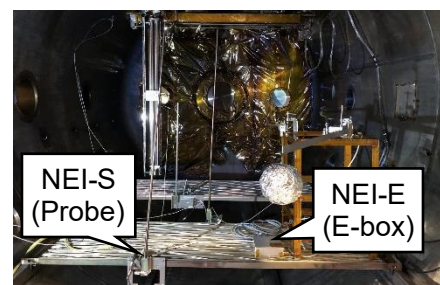


図 4. S-310-46 用 NEI. プラズマ計測試験のためチェンバ内に設置

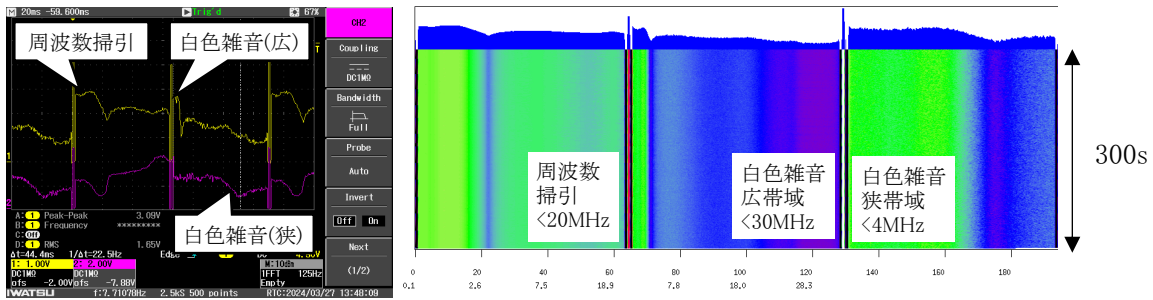


図 5. S-310-46 用 NEI の出力の確認例. 周波数掃引計測の出力(前半 62.5ms, Ch1(黄))では 21.3ms, 白色雑音印加計測の広帯域出力(後半 62.5ms, ch1(黄))では 5.5ms, 狭帯域出力(後半 62.5ms, ch2(赤))では 44.4ms にプローブ容量極小が確認できる. いずれも 2.84MHz に対応.

密度は $7.8 \times 10^4 / \text{cc}$ と見積られる. 真空試験として, 20 分間の連続計測を実施し, 開始から終了まで計測データの出力に異常が生じないことも確かめられた.

3. 機上調整型 NEI 試作機によるプラズマ計測実験

機上調整型 NEI(OT-NEI)のブロック図を図 6 に示す. プローブ容量を計測するための容量ブリッジに, 従来の NEI ではセンサー, ダミーケーブルを接続して, プローブ本体以外のセンサー筐体・ハーネス部分もつ容量をダミーケーブルで相殺することで, プラズマにひたされたプローブ本体のみの容量の周波数特性を正確に計測することができる. OT-NEI では, サイズ・重量を要するダミーケーブルに替えて, バラクタダイオードを利用する. バラクタダイオードは印加する逆電圧を変更することでダイオードのアノード・カソード間の容量が変化する性質を利用した素子である. バラクタダイオードのカソード同士を接続して, その直列回路をダミーケーブルと交換すれば, カソードに十分高い高電位を印加しつつ, その電圧を変化させることで容量を調整することが可能となる. 印加電圧を DAC で生成するにすれば可変コンデンサでは難しかった微調整も十分可能となる.

2024 年 3 月の実験では, OT-NEI の試作機によるプラズマ計測試行も併せて行った. センサーハーネスが 1m 程度の場合, ダミーケーブルも同等の長さとなり, 容量は 100pF 前後が必要となる. 今回利用した BB201 は逆向き・直列接続のバラクタダイオードがパッケージ化されており, その容量範囲は 13~48pF になるので[3], 100pF 前後の調整が可能のように, 3 個の BB201 を並列接続した. 試作機では DAC による電圧印加部は含まず, 直流電源装置で生成した電圧を外部から入力した. 計測実験では NEI-S 予備品(BeCu 円筒. 直径 1cm 前後, 長さ 1m)を約 0.6m のハーネスで容量ブリッジに接続したが, 容量バランス調節時は, プローブ本体を取り除いた NEI-S 筐体と同じハーネスで取り付けて, 出力レベルが最小となるようにバラクタダイオードの印加電圧を調節して, 印加電圧を

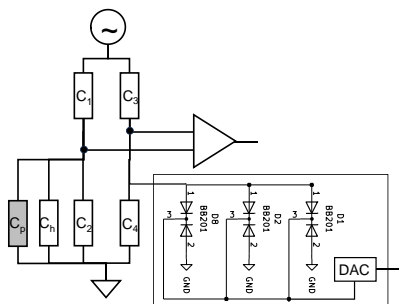


図 6. OT-NEI のブロック図. ダミーケーブルをバラクタダイオード回路と置換

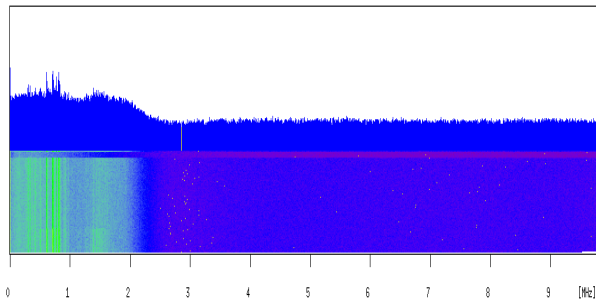


図 7. OT-NEI の計測データ例. 図 5 の直前に計測. プローブ容量最小の周波数が黄色の実線もしくは点で示されている. 容量最小が 2.9MHz 前後で多く検出.

2.05V に決定した。プローブ無の NEI-S 筐体を NEI-S 予備品に戻して、OT-NEI 試作機をチェンバ内に設置して、プラズマ計測実験を行った。計測実験で得られたデータ例を図 7 に示す。この計測は図 5 の直前に行われたが、S-310-46 用 NEI と同様に 2.9MHz 前後で UHR に対応するプローブ容量極小を計測できていることが確認できる。S-310-46 用 NEI で計測された 2.84MHz との若干の差異の原因については、OT-NEI の検出値の分散、計測タイミングの相違、センサー位置の相違などが考えられる。S-310-46 用 NEI に比べて極小が明瞭でなく、検出された極小周波数が分散しているのは、容量ブリッジの差動出力をノイズレベルの高いサンプラ(ADI, Analog Discovery2)でサンプルしたことによるものと推定している。今後の実験では、差動信号の増幅、より低ノイズレベルのサンプラ利用等を試行予定である。

4. まとめ

観測ロケット S-310-46 号機で目的とするスポラディック E 層の詳細観測にむけて、搭載用 NEI では、従来の周波数掃引計測の時間間隔を 125ms から 62.5ms に短縮するとともに、将来の更なる分解能向上に向けて、白色雑音印加計測機能の追加を行った。2024 年 2 月末までにフライトモデルの製造、単体での調整、環境試験を完了して、単体性能確認として 2024 年 3 月に JAXA 宇宙科学研究所の大型スペースサイエンスチェンバを利用して、プラズマ計測試験を行った。試験の結果、時間短縮を行った周波数掃引計測、新規に追加した白色雑音印加計測の双方で、プラズマの電子密度を問題なく計測できることを確認した。

2024 年 3 月の実験では、上記の試験と合わせて、将来の小型・超小型衛星への NEI 搭載で要請される小型化・重量削減に向けて、機上調整 NEI (OT-NEI) 試作機によるプラズマ計測実験を行った。従来の NEI では、容量バランス微調整のために容量ブリッジにはダミーケーブルが接続されているが、OT-NEI では小型軽量化が可能で容量微調整が可能なバラクタダイオード回路と置き換える。計測実験では、従来型 NEI と同様に OT-NEI でもプラズマ計測が十分可能なことが確かめられた。

謝辞

本研究は、JAXA/ISAS スペースプラズマ共同利用設備の大型スペースサイエンスチェンバを用いて行われました。実験全般において ISAS 阿部琢美准教授に、実験時の設備利用においては ISAS 岩倉優太氏に多大な支援をいただきました。また、S-310-46 号機搭載用 NEI の新規要素(白色雑音印加計測機能)を含む設計、製造では、システム計測株式会社に多大な支援をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] Oya, H., Study on boundary value problems of magneto-active plasma and their application to space observation, PhD thesis, Kyoto Univ., 1967.
- [2] Wakabayashi, M., T. Suzuki, J. Uemoto, A. Kumamoto, and T. Ono, Impedance probe technique to detect the absolute number density of electrons on-board spacecraft in An Introduction to Space Instrumentation (Edited by K. Oyama and C. Z. Cheng), 107-123, 2013.
- [3] Data sheet, BB201, Low-voltage variable capacitance double diode, NXP Semiconductors, <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/BB201.pdf>