

電離圏観測ロケット搭載用インピーダンスプローブのプラズマ計測試験

熊本篤志(東北大)

Plasma measurement test of impedance probes to be installed on the sounding rockets for ionospheric research

A. Kumamoto (Tohoku Univ.)

1. はじめに

極域カस्प領域の電離圏イオンアウトフロー現象解明を目的として 2021 年度冬に Svalbard から打上予定の観測ロケット SS-520-3 号機, 中規模伝搬性電離圏擾乱時の E-F 領域トモグラフィを目的として 2022 年度夏に内之浦から打上予定の観測ロケット S-520-32 号機には, ロケットの軌跡に沿って電子密度計測を行うため, インピーダンスプローブ (Number density measurement of electron by impedance probe, NEI) の搭載が予定されている. これらが問題なくプラズマを計測できることを確認するため, JAXA 宇宙科学研究所の大型スペースプラズマチェンバーを利用して, プラズマ計測試験を実施した. S-520-32 号機の搭載観測機器開発では, 文科省宇宙航空科学技術推進委託費の支援を得て, 搭載機器の内製を題材として大学院生, 学部・高専学生の技術教育が進められている. インピーダンスプローブの開発では, FPGA の Firmware/Software 内製による機上電子密度決定機能の実装に取り組んでおり, 今回のチェンバー実験では実際のプラズマ計測での有効性確認も行った. あわせて, 将来のミッションに向けて, インピーダンスプローブの校正や観測ロケット以外の飛翔体搭載対応をより容易にしていくための試作モデルの開発にも取り組んでおり, そのプラズマ計測実験も行った.

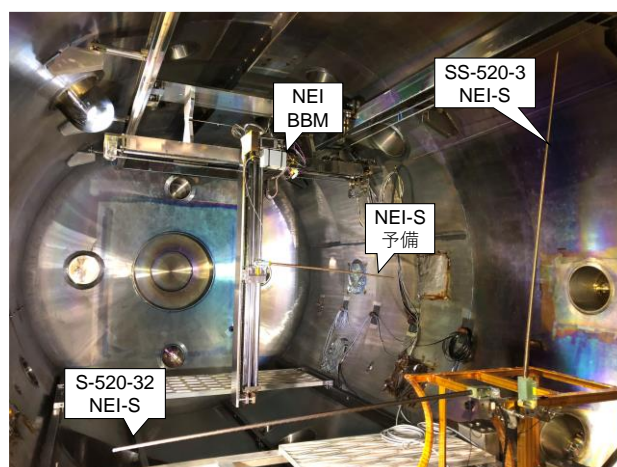


図 1. 大型スペースサイエンスチェンバー内の各プローブ設置状況

2. SS-520-3 および S-520-32 搭載用インピーダンスプローブのプラズマ計測試験

インピーダンスプローブは, プラズマ中に伸展したプローブの容量が, 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, 電子数密度の精密決定を行う観測装置である [1, 2]. プラズマの温度の変化によって, プローブ容量は増減しうるが, 極小となる周波数は変化しない利点から, 数多くの電離圏観測ロケットに搭載されてきた [3-13]. 最近の取得データは JAXA 宇宙科学研究所の宇宙科学データアーカイブ DARTS (<https://www.darts.isas.jaxa.jp/stp/rocket/index.html>)からも公開されている. いずれの観測ロケット搭載用インピーダンスプローブも, 飛翔前の単体試験として, JAXA 宇宙科学研究所大型スペースサイエンスチェンバーを利用してプラズマ計測試験を行ってきた. SS-520-3 号機および S-520-32 号機搭載用インピーダンスプローブも, 2020 年 12 月 22~25 日に同チェンバーを利用して, プラズマ計測試験を実施した. 図1に示すように, SS-520-3 および S-520-32 搭載用インピーダンスプローブは, チェンバー内の後方拡散プラズマ源に近い位置

に固定設置した。後方拡散プラズマ源でアルゴンガスを電離し、チェンバー内にプラズマを生成した。また、スペースチェンバー外のヘルムホルツコイルで背景磁場を $0 \sim 70000\text{nT}$ の範囲で変化させた。各インピーダンスプローブの計測データを図2に示す。黄色のプロファイルの横軸は周波数、縦軸はプローブ容量、マークが周波数掃引の起点を示している。プラズマによるプローブ容量

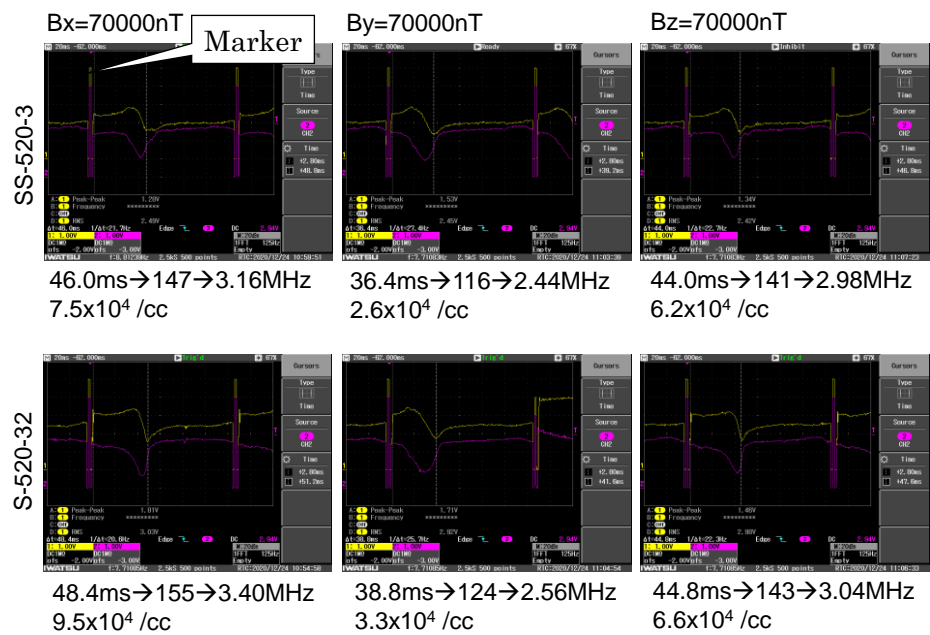


図2. 各インピーダンスプローブの計測データ

極小を検出できていることが確認できる。プローブ容量が極小となる周波数を UHR 周波数とみなして、 $3 \sim 9 \times 10^4 / \text{cc}$ の電子密度値が得られた。背景磁場の方向を変化させると、チェンバー内のプラズマのフローパターンが変化して電子密度が若干変化するが、両プローブは接近させて設置しているので、おおむね同程度の密度値を計測できている。

3. S-520-32 搭載用インピーダンスプローブの電子密度機上自動決定機能の確認

従来の電離圏観測ロケット搭載用インピーダンスプローブは、容量ブリッジの検波出力(周波数ステップ数 400)をそのままテレメータに出力して地上でプローブ容量極小の識別、UHR 周波数と電子密度の決定を行っていた。つまりは、1点の電子密度(1ワード相当)の決定のために 400ワードの A/D 値を伝送していることになる。もし機上でプローブ容量の極小を識別し、UHR 周波数を決定できれば、1計測点あたりのテレメータ伝送量を $1/400$ に削減でき、その分、時間分解能を上げて計測点を増やすことも可能となる。そこで S-520-32 号機のインピーダンスプローブ FPGA software 内製で、UHR 周波数を機上決定するためのアルゴリズムを実装し、今回のチェンバー実験で、実際のプラズマ計測でも有効に機能するか確認した。図3に、チェンバー実験の際に得られたデータを示す。試験用 software では、従来同様のプローブ容量データ 400ワードに加えて、電子サイクロトロン周波数より上でプローブ容量が最小となる周波数を探す、というアルゴリズムで機上決定した UHR 周波数 1ワードを出力した。背景磁場強度を変化させた際の機上決定データ(図3・紫の

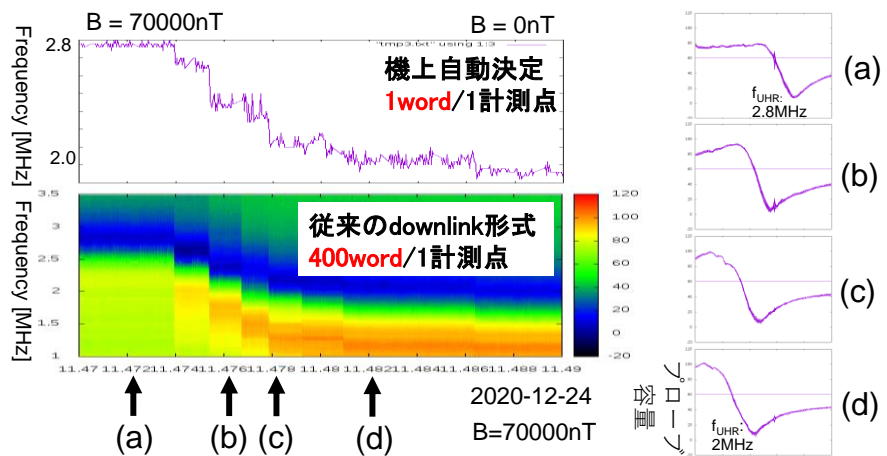


図3. 機上自動決定データの例

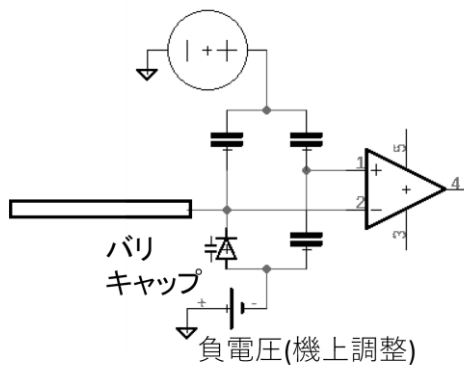


図 4. 電子的に較正可能な容量ブリッジ回路

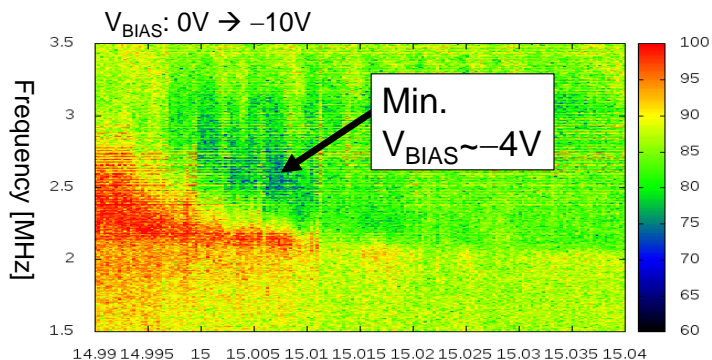


図 5. 試作モデルで計測されたプローブ容量

プロファイル)から、このアルゴリズムで UHR 周波数の変動を比較的良好に追跡できていることを確認した。

4. 電子的な較正が可能なインピーダンスプローブ

正確な UHR 周波数の計測には、筐体・ハーネスの浮遊容量も含めブリッジ回路の容量を精密にバランスさせて正味のプローブ容量を出力させる必要がある。容量バランスがとれていないと、プローブ容量値だけでなく、容量極小となる周波数もずれて、正確な UHR 周波数は決定できない。このため、これまでの観測ロケット搭載用インピーダンスプローブでは、計器合わせでフライト用の筐体・ハーネスを確定した上で、可変コンデンサ・ダミーケーブルをハードウェア的に調整して容量ブリッジのバランスをとってきた。この手順は不可逆で、やり直す場合はダミーケーブル交換等のハードウェア改修の必要が生じる。電子回路部のシャーシを閉じるとハーネスの状態変更が不可能になる、という制約は、今後観測ロケット以外の飛行体への搭載を考える際に問題となる可能性がある。そこで、図 4 に示すように、容量ブリッジ回路の一部をバリキャップに変更して、印可する負電圧を変更することで、電子的にバランス調整を行えるインピーダンスプローブの試作モデルを製作し、今回のチェンバー実験で、実際のプラズマ計測にも使用できることを確認した。図 5 に得られたデータの例を示す。プラズマによるプローブ容量極小を検出できていて、かつ容量ブリッジに印可する負電圧を 0V から -10V の範囲で変化させると、バリキャップの容量変化によって、ブリッジ回路のバランスが変化し、プローブ容量の極小周波数が変化していることを確認できた。このとき使用したプローブ・ハーネスに対しては、事前の較正から印可電圧 -4V でバランスすることを確認していた。したがって、-4V を印可した際のプローブ容量極小(図 5 矢印)が正確な UHR に対応する。別のプローブ・ハーネスを接続した場合も、印可電圧を適切に変更することで、ハードウェア改修を行うことなく正確な UHR を計測することが可能となる。今回のチェンバー実験では、白色雑音印可方式の試作モデルで試験を行ったため、プローブ容量の計測 S/N が悪かった。今後の実験では、掃引周波数方式の試作モデルを準備して、高 S/N の計測データで性能評価を進めることを予定している。

5. まとめ

JAXA 宇宙科学研究所の大型スペースサイエンスチェンバーを利用して、2020 年 12 月 22~25 日に、電離圏観測ロケット搭載用インピーダンスプローブのプラズマ計測試験、将来のインピーダンスプローブ改良に向けた計測実験を行い、以下の結果を得た。(a) チェンバー内に磁化プラズマ(磁場強度 0~70000nT, 電子密度 $\sim 10^4$ /cc)を生成して SS-520-3 号機および S-520-32 号機搭載用インピーダンスプローブのプラズマ計測試験を実施し、計測性能に問題がないことを確認した。(b) S-520-32 号機搭載用インピーダンスプローブの機上ソフトウェアに、電子密度機上決定のための簡易なアルゴリズムを実装し、実際のプラズマ計測においても比較的良好に機

能することを確認した。電子密度が 10^2 /cc 程度になると、プローブ容量が全周波数帯域で低下して、UHR 周波数の容量極小検出が困難になってくる可能性があるため、今後の実験では、大型紫外光源の利用、3 軸可動アームでプラズマ源からの距離を遠ざける等の方法で 10^2 /cc 程度のプラズマ計測を模擬して、机上決定アルゴリズムの検証・改良を進めることを予定している。(c) インピーダンスプローブ改良の試みとして、正確な UHR 周波数の計測に最も重要な容量ブリッジ回路のバランス調整を電子的に実施可能なインピーダンスプローブの試作モデルでプラズマ計測実験を行い、良好な計測結果を得た。この方式は、バランス調整手順が可逆となり何度もやり直せるメリットがあり、大規模な探査機に搭載するようなケースにおいても柔軟な対応が可能となる。

謝辞

本研究は、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所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ー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。また本研究の一部は、文科省宇宙航空科学技術推進委託費・宇宙航空人材育成プログラム「観測ロケット実験を通じた宇宙機器エンジニアリングスキル養成プログラム」(研究代表者:奈良高専芦原佑樹准教授, 期間:2019~2021 年度)の支援を受けて行われました。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] Yamamoto, M.-Y., Ono, T., Oya, H., Tsunoda, R. T., Larsen, M. F., Fukao, S., and Yamamoto, M., Structures in sporadic E observed with an impedance probe during the SEEK campaign: Comparisons with neutral-wind and radar-echo observations, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 11, 1781-1784, 1998.
- [4] Yamamoto, M.-Y., Study on the wake structure and associated plasma wave turbulence observed by using sounding rocket experiments, PhD thesis, Tohoku Univ., 2001.
- [5] Wakabayashi, M., T. Ono, H. Mori, and P. A. Bernhardt, Electron density and plasma waves in mid-latitude sporadic-E layer observed during the SEEK-2 campaign, *Ann. Geophys.*, 23, 2335-2345, doi:10.5194/angeo-23-2335-2005, 2005.
- [6] Wakabayashi, M. and Ono, T.: Multi-layer structure of mid-latitude sporadic-E observed during the SEEK-2 campaign, *Ann. Geophys.*, 23, 2347-2355, 2005.
- [7] Wakabayashi, M., Electron Density Structure of Disturbed State Ionosphere Observed by using Impedance Probe -Rocket Experiments and Instrumental Developments-, PhD thesis, Tohoku Univ., 2007.
- [8] Suzuki, T., T. Ono, M. Iizima, M. Wakabayashi, and A. Kumamoto, Characteristics of the cyclotron harmonic resonances found by impedance probe experiments in a laboratory plasma, *J. Plasma Fusion Res. Ser.*, 8, 165, 2009.
- [9] Suzuki, T., T. Ono, J. Uemoto, M. Wakabayashi, T. Abe, A. Kumamoto, and M. Iizima, Sheath capacitance observed by impedance probes onboard sounding rockets: Its application to ionospheric plasma diagnostics, *Earth Planets Space*, 62, 579-587, 2010.
- [10] Uemoto, J., T. Ono, T. Yamada, T. Suzuki, M.-Y. Yamamoto, S. Watanabe, A. Kumamoto, and M. Iizima, Impact of lithium releases on ionospheric electron density observed by impedance probe during WIND campaign, *Earth Planets Space*, 62, 589-597, 2010.
- [11] Suzuki, T., On the impedance probe measurements in space plasmas, PhD thesis, Tohoku Univ., 2011.
- [12] Endo, K., A. Kumamoto, and Y. Katoh, Observation of wake-induced plasma waves around an ionospheric sounding rocket, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 120(6), 5160-5175, doi:10.1002/2014JA020047, 2015.
- [13] Endo, K., Study of plasma waves induced through the wake formation process behind an ionospheric sounding rocket, PhD thesis, Tohoku Univ., 2018.