

電離圏イオン組成・電子密度計測に向けた 広帯域インピーダンスプローブによるプラズマ計測実験

熊本篤志 (東北大)

1. はじめに

本研究では、2015年10月26～29日の期間に、宇宙航空研究開発機構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、(1) 広帯域インピーダンスプローブ **BBM** のプラズマ計測実験、(2) **S310-44/PWM** の飛行前プラズマ計測実験、の2項目の実験を実施した。各実験の結果を以下に述べる。

2. 広帯域インピーダンスプローブ **BBM** のプラズマ計測実験

電離圏の電子密度に加えてイオン密度・組成計測が行えるように広帯域化された新型のインピーダンスプローブ装置の開発を進めている。2014年5月13～15日の実験では、後方拡散型プラズマ源で生成された **He** イオンによる、広帯域インピーダンスプローブの試作モデル(**BBM**)のプラズマ計測実験を実施した。現行のインピーダンスプローブは0.1～25 MHzの周波数帯域で、プラズマ中でのプローブ容量が極小となる高域混成共鳴(**UHR**)周波数を計測することによって電子密度を導出する[1]。プローブ容量が極小となる周波数は低周波域にも存在し、低域混成共鳴(**LHR**)周波数と呼ばれる。 O^+, NO^+, O_2^+ イオン及び電子から成るプラズマ中での **LHR** 角周波数 ω_{LH} は以下の式で表される。

$$\omega_{LH} = \sqrt{\frac{\Pi_{O^+}^2 + \Pi_{NO^+}^2 + \Pi_{O_2^+}^2}{1 + \Pi_e^2/\Omega_e^2}} \quad (1)$$

ただしここで $\Pi_{O^+}, \Pi_{NO^+}, \Pi_{O_2^+}, \Pi_e$ はそれぞれ O^+, NO^+, O_2^+ , 電子のプラズマ角周波数, Ω_e は電子サイクロトロン角周波数である。**LHR** 周波数はイオン密度・組成に依存するので、インピーダンスプローブの動作周波数帯域の下限を100 Hzまで拡大し、電離圏で**LHR** 周波数でのプローブ容量の

極小を計測できるようにすることで、電離圏イオンの密度・組成の観測が可能となる。

図1に、高度100 km, 150 km, 300 kmの電離圏プラズマ中で観測されると期待されるプローブ容量の見積値を示す。プラズマ中のプローブ容量 C_P は以下の式で見積もることができる。

$$\frac{1}{i\omega C_P} = Z_P + \frac{1}{i\omega C_S} \quad (2)$$

但しここで C_S はシース容量である。 Z_P はプローブ周辺のプラズマによるインピーダンスで以下の式で表される[2]。

$$Z_P = \frac{1}{i\omega 2\pi\epsilon_0 K_\perp L} \left(\ln \frac{L}{r} - 1 + \ln \sqrt{\frac{K_\perp}{K_\parallel}} \right) \quad (3)$$

$$K_\perp = 1 - \sum_s X_s U_s / (U_s^2 - Y_s^2) \quad (4)$$

$$K_\parallel = 1 - \sum_s X_s / U_s \quad (5)$$

$$X_s = \Pi_s^2 / \omega^2 \quad (6)$$

$$Y_s = \Omega_s / \omega \quad (7)$$

$$U_s = 1 - i\nu_s / \omega \quad (8)$$

ただしここで s は粒子種, Π_s は粒子 s のプラズマ角周波数, Ω_s は粒子 s のサイクロトロン角周波数, ν_s は粒子 s の衝突周波数である。図1の各容量プロフィールは、表1のパラメータを式(2)～(8)に代入して得られる。衝突周波数が高いために、高度100 kmでは**LHR** 周波数での極小が識別できないが、衝突周波数の低い高度150 km, 300 kmでは、**LHR** が十分検出可能である。

一方、2014年5月13～15日の実験において、広帯域インピーダンスプローブの**BBM** で計測されたプラズマ中のプローブ容量を図2に示す。この時のプラズマは**He** を電離して生成しており、電子密度は $2.3 \times 10^5/cc$ であった。また80000 nT

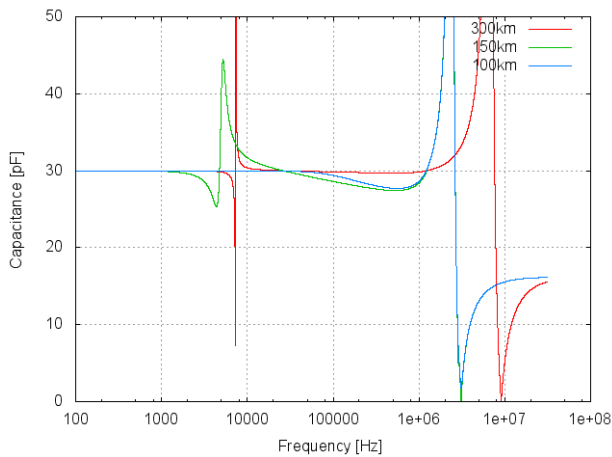


図 1. 高度 100km, 150km, 300km の電離圏で観測されるプラズマ中のプローブ容量の計算値

表 1. 図 1 の計算で使用したパラメータ

Region	E	E	F
ALT [km]	100	150	300
v_{en} [Hz]	1e5	1e3	30
v_{in} [Hz]	1e4	1e2	1
B [nT]	43960	43960	43960
N [cc]	1e5	1e5	1e6
$O_2^+ \& NO^+$	100%	100%	0%
O^+	0%	0%	100%
Cs [pF]	30	30	30
L [m]	1.2	1.2	1.2
r [m]	0.01	0.01	0.01

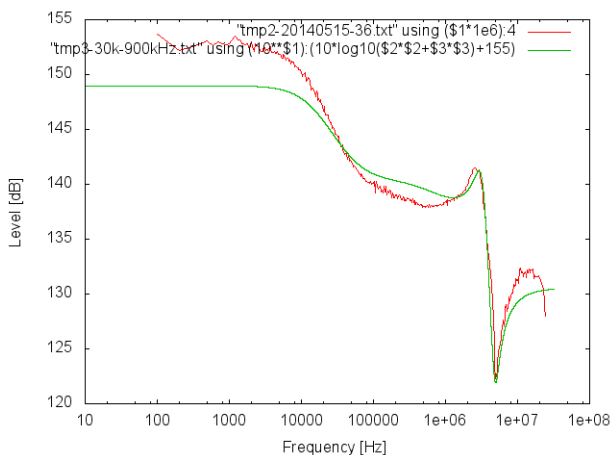


図 2. 2014 年度の実験で広帯域インピーダンスプローブ BBM を用いて計測されたプローブ容量 (赤) 及び計算から求めたプローブ容量 (緑)

の磁場を印加していた。これらから、LHR 周波数は 24 kHz となるが、その周波数付近で観測されたプローブ容量は極小とはならなかった。これは後方拡散型プラズマ源で生成されたチェンバ内のプラズマ中において、衝突周波数が十分に低くなかったことを示唆している。図 2 に計算から求めたプラズマ中のプローブ容量を、計測されたプローブ容量に重ねて示す。高周波の UHR (極小)・シース共鳴 (極大) 近傍のプロファイルに合うように電子の衝突周波数を設定すると 900 kHz となるが、この場合 LHR 周波数付近に極小は見られない。同様の計算によれば、LHR 周波数付近に極小を検出するためには電子の衝突周波数を 20 kHz 程度まで低減する必要がある。計測されたプラズマ中のプローブ容量は 10 kHz よりも下の周波数帯域で図 1 には見られない特徴的な容量増大を示している。これはシースが容量成分に加えて、並列の抵抗成分を持っていることを示している。図 2 のプロファイルの計算では式(2)に換えて以下の式を用いた。

$$\frac{1}{i\omega C_p} = Z_p + \frac{1}{i\omega C_s + 1/R_s} \quad (9)$$

ここで R_s はシース抵抗である。図 5 の計算ではシース容量 120 pF, シース抵抗 30 kΩ とした。

チェンバで、LHR の検出実験を行うためには、電子の衝突周波数低減策を見いだす必要がある。その試みとして 2015 年 10 月 26~29 日の実験では、後方拡散型プラズマ源に代えて、大口径紫外線光源で生成されたプロピレン(C_3H_6)イオンを用いた。また磁場制御は行わず、背景磁場 (46532 nT) のままとした。チェンバ内での広帯域インピーダンスプローブ BBM の設置状況を図 3 に示す。プローブは 3 軸可動アームに設置したが、チェンバ内での密度差があまり大きくなかったことから、大口径紫外線光源の正面の 1 点を定位置として計測を行った。この実験で計測されたプローブ容量プロファイルを図 4 (~5 MHz) および図 5 (~10 kHz) に示す。導入ガスの流量を大きくするほどチェンバ内のガス圧が上昇し(赤: 7.5×10^{-4} Pa, 緑: 3.2×10^{-3} Pa, 青: 8.0×10^{-3} Pa, 紫: 1.6×10^{-2} Pa), イ

オン・電子密度が上昇するのに対応して、UHR 周波数の上昇を確認できる。一方、この実験でも 10 kHz 以下での明確なプローブ容量の極小を確認することができなかった。但し 3.2×10^{-3} Pa では 2 kHz 付近にプローブ容量プロファイルの若干の傾きの変化が見られ、極小に対応している可能性がある。

3. S310-44/PWM の飛翔前プラズマ計測実験

S310-44 号機搭載用プラズマ波動受信機(PWM)の飛翔前試験として、2015 年 10 月 26～29 日の試験では、チェンバ内に搭載用 PWM を合わせて設置し、搭載用 PWM が真空中でも正常に動作し、計測が行えることを確認した。その後、搭載用 PWM は ISAS での噛み合わせ試験・射場でのフライトオペレーションを経て、2016 年 1 月 15 日に打ち上げられ、 S_q 電流系中心付近の高度 160km までの領域において、300Hz～22MHz の帯域でのプラズマ波動観測に成功した(図 6)。VLF 帯の観測では、電離圏 E 領域より上の高度帯(打上 70～300 秒後)で、中緯度のこの高度帯にはまれな LHR 周波数付近(数 kHz)のバンド状のプラズマ波動の強度増大が見られており、 S_q 電流系中心付近の電子加熱現象との関連に注目して、観測データの解析が進められている。HF 帯の観測では、S520-26 号機の PWM で報告された UHR 周波数付近のウェイク起源のプラズマ波動[3]が観測された場合に放射領域の特定に役立つようモノポール受信を行っていたが、UHR 波動は観測されなかった。これは今回観測対象とした電離圏 E 領域昼側では電子の衝突周波数が高く減衰が大きかったことによると考えられる。

4. まとめ

2015 年 10 月 26～29 日の実験において、2 項目の実験を実施し、以下の結果を得た。

1. 将来の電離圏イオン密度・組成計測に向けて、広帯域インピーダンスプローブの BBM 試験を行った。チェンバ内では衝突周波数が高いため、低

域混成共鳴(LHR)によるプローブ容量の極小を検出できなかったが、現行 NEI と同様の UHR によるプローブ容量の極小、シース抵抗による低周波域特有のプローブ容量の増大を確認することはできている。

2. 観測ロケット S-310-44 号機搭載用プラズマ波動受信機(PWM)のプラズマ内動作実験を行い、所期の波動計測性能を有することを確認した。この PWM は 2016 年 1 月 15 日の観測において、電離圏 E 領域 S_q 電流系付近での LHR 周波数付近のプラズマ波動の強度増大現象の観測に成功した。

広帯域インピーダンスプローブによる実験では、後方拡散型プラズマ源・大型紫外光源のいずれを使用した場合も明確な LHR の検出には至らなかった。チェンバ実験で計測されたシース抵抗成分を含むプローブ容量プロファイルは、電子が、直流のシース電流としてプローブ-プラズマ間を移動していたことを示唆している。これらの電流は、プローブに DC 電圧を印加することによって低減可能なはずで、電子の衝突周波数低減にも有効となる可能性がある。今後の実験では、広帯域インピーダンスプローブ BBM に DC 電位印加機能を追加し、計測されるプローブ容量プロファイルに変化があるか、LHR 周波数付近での容量極小が見いだせるようになるか、検証することを計画している。

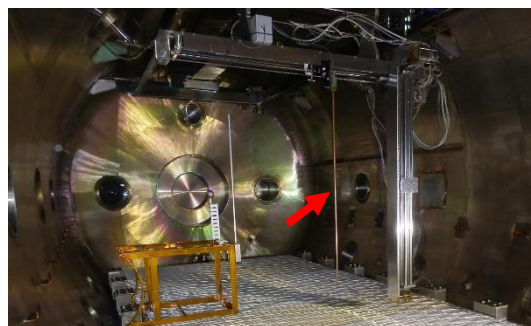


図 3. チェンバ内に設置された広帯域インピーダンスプローブ(赤矢印)。奥の壁の中央が大口径紫外線光源のシャッター。

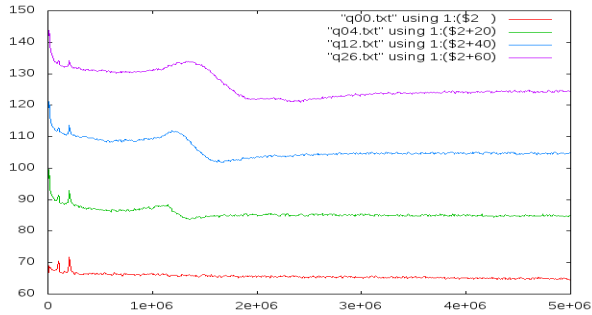


図4. 2015年度の実験で広帯域インピーダンスプローブBBMを用いて5MHzまでの帯域で計測されたプローブ容量

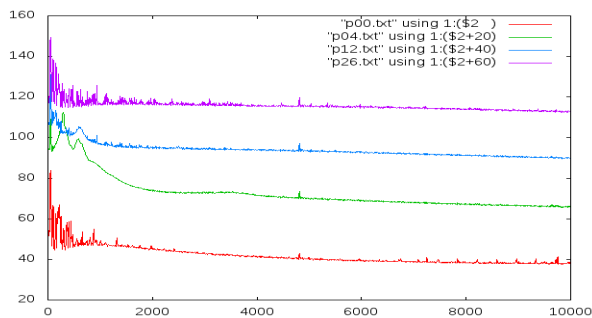


図5. 2015年度の実験で広帯域インピーダンスプローブBBMを用いて10kHzまでの帯域で計測されたプローブ容量

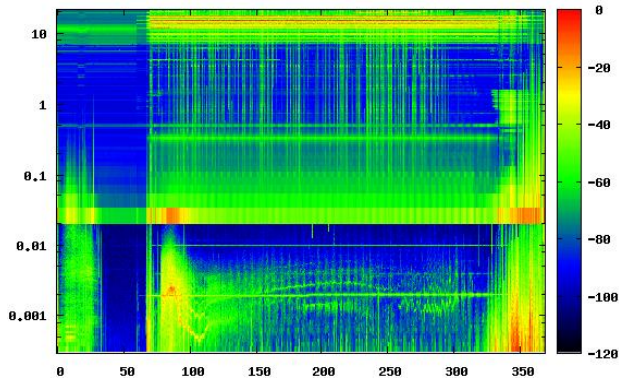


図6. S310-44号機の飛行時(2016年1月15日)に得られたPWMの観測データ。横軸は打上からの時刻(秒)、縦軸は周波数(MHz)色は波動強度(dBm)を示す。

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を用いて行われました。実験計画においてはISAS阿部琢美准教授に、実験設備の運用にはISAS中園智幸氏に大変お世話になりました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] Wakabayashi, W., T. Suzuki, J. Uemoto, A. Kumamoto, and T. Ono (2013), Impedance probe technique to detect the absolute number density of electrons on-board spacecraft, *An Introduction to Space Instrumentation*, edited by K. Oyama and C. Z. Cheng, 107–123.
- [2] Balmain (1964), K. G., The impedance of a short dipole antenna in a magnetoplasma, *IEEE Trans.*, AP12, 5, 605–617.
- [3] Endo, K., A. Kumamoto, and Y. Katoh (2015), Observation of wake-induced plasma waves around an ionospheric sounding rocket, *J. Geophys. Res.*, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 120(A6), 5160-5175, doi:10.1002/2014JA020047.