

S520-29 号機搭載 NEI および 電離圏イオン組成計測用広帯域 NEI 試作機によるプラズマ内計測実験

熊本篤志, 津川靖基, 遠藤研, 佐々木悠朝 (東北大)

1. はじめに

本研究では, 2014 年 5 月 13~15 日および 2015 年 1 月 5~8 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) S520-29/NEI の飛翔前プラズマ計測実験, (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, (3) 不均一プラズマ中のプラズマ密度計測実験, の 3 項目の実験を実施した. 各実験の結果を以下に述べる.

2. S520-29/NEI の飛翔前プラズマ計測実験

2014 年 8 月 17 日に打ち上げられた S520-29 号機に搭載された電子数密度観測用インピーダンスプローブ(NEI)の飛翔前試験として, 2014 年 5 月 13~15 日に, チェンバ内に搭載用 NEI とチェンバ付属の参照用インピーダンスプローブを設置し (図 1), 真空引き後, 後方拡散型プラズマ源で Ar^+ プラズマを生成して, 搭載用 NEI がプラズマ中でも正常に動作し, 計測が行えること, 双方のインピーダンスプローブでの計測値に大幅な相違が生じていないことを確認した. その後, 搭載用 NEI 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, 2014 年 8 月 17 日に打ち上げられ, Sporadic-E 層・F 領域下部の電子密度高度分布 (図 2・図 3) の計測に成功した.

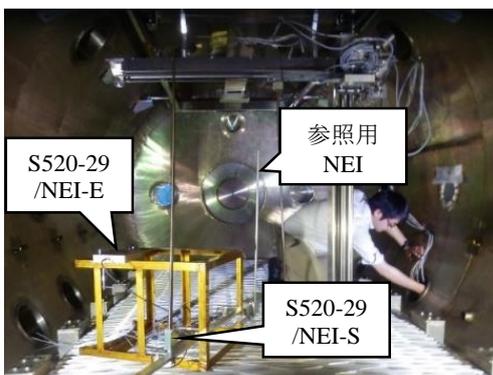


図 1. S520-29/NEI 及び参照用 NEI の設置状況

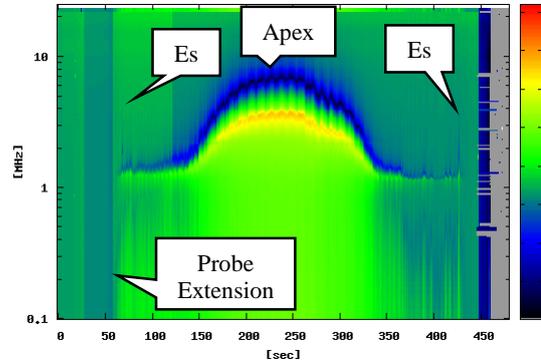


図 2. S520-29 飛翔時 (2014 年 8 月 17 日) に得られたプローブの等価容量データ

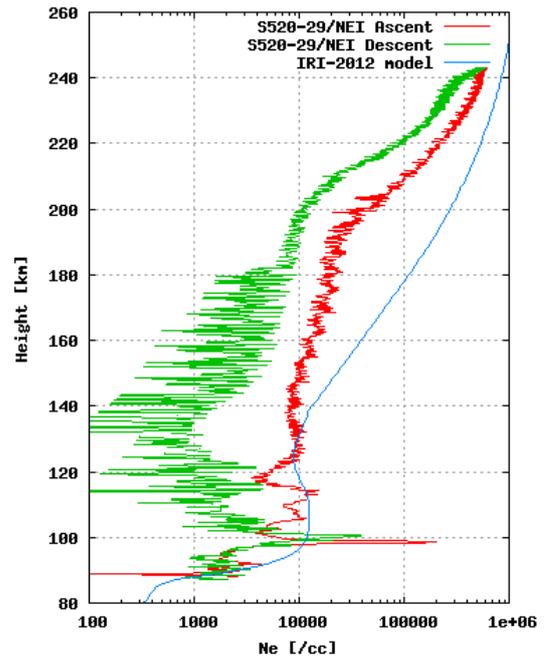


図 3. S520-29/NEI で観測された電子密度の高度分布 (赤: 上昇時, 緑: 下降時)

3. 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, 2 節で述べた S520-29/NEI の実験と合わせて, 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0.1~25MHz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100Hz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4に, 高度100km, 150km, 300km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4の各容量プロファイルは, 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100km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150km, 300kmでは, LHRが十分検出可能である.

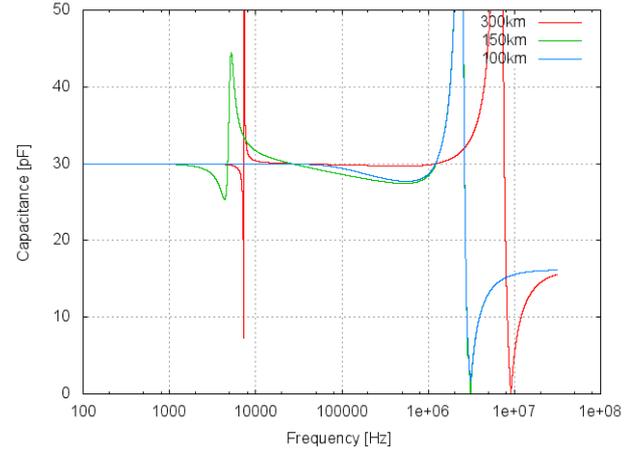


図4. 高度100km, 150km, 300kmの電離圏で観測されるプラズマ中のプローブ容量の計算値

表1. 図4の計算で使ったパラメータ

Region	E	G	F
ALT [km]	100	150	300
ν_{en} [Hz]	1e5	1e3	30
ν_{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

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5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 $2.3 \times 10^5 / \text{cc}$ であった。また 80000 nT 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ー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5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4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5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 $30 \text{ k}\Omega$ とした。

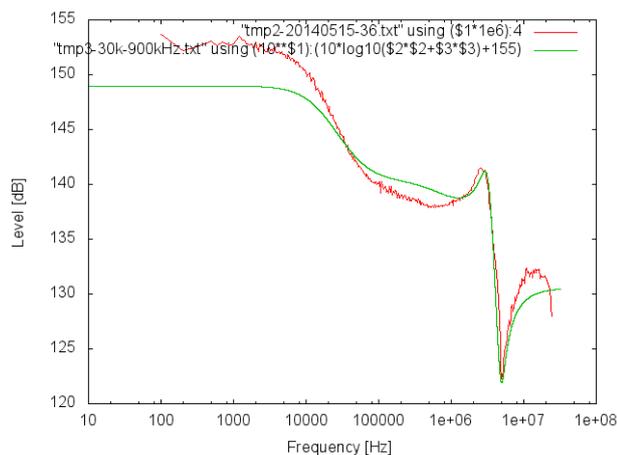


図5. 広帯域インピーダンスプローブのBBMを用いて計測されたプラズマ中のプローブ容量 (赤) 及び計算から求めたプラズマ中のプローブ容量 (緑)

4. 不均一プラズマ中でのプラズマ密度計測実験

観測ロケットに搭載されたインピーダンスプローブは、観測ロケットがつくるウェイク領域に入ったり出たりしながら電子密度を計測する。ウェイク外では電離圏の電子密度が観測されるのに対し、ウェイク内ではこれより低い電子密度が観測される (図6) [3]。全長 1.2 m のプローブがウェイクの境界を交差した場合に、電子密度の計測がどのようになるかを明らかにするため、2015年1月5~8日の実験では、チェンバー内に金属壁を立てて (図7)、後方拡散型プラズマ源で生成されたプラズマがそのまま下流に流れる高密度領域と、金属壁で遮られた低密度領域をつくり、その境界面に対し平行・垂直に設置したインピーダンスプローブ (図7) を水平に移動させて、双方で計測した電子密度値を比較した。各プローブの電子密度計測値を図8に示す。各プローブはそれぞれの中点で交差するように設置されており、このプローブ中点が高密度領域にある場合は、双方の電子密度計測値がほぼ一致しているのに対し、プローブ中点が金属壁背面の低密度領域に入っていくにつれて双方の電子密度計測値の差異が拡大する。このことはインピーダンスプローブの電子密度計測値が (1) 全長の半分以上がウェイク外にある場合はウェイクの影響がわずかであること、(2) 全長の半分以上がウェイク内に入ったとき、ウェイク内外双方の影響を受けた電子密度計測値となることを示している。

(a) Alt. 288.6~286.5 km (Descent)

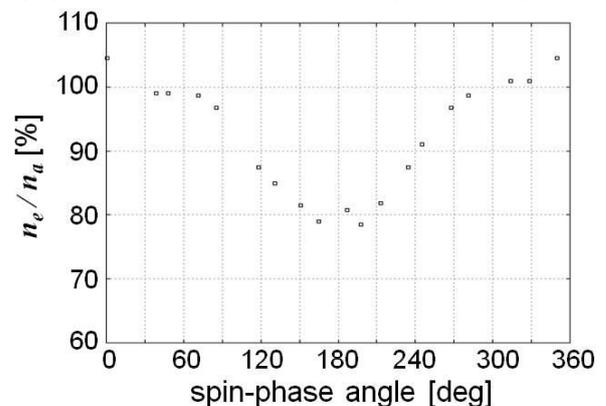


図6. S520-26号機で観測されたウェイク内外での電子密度観測例[3]

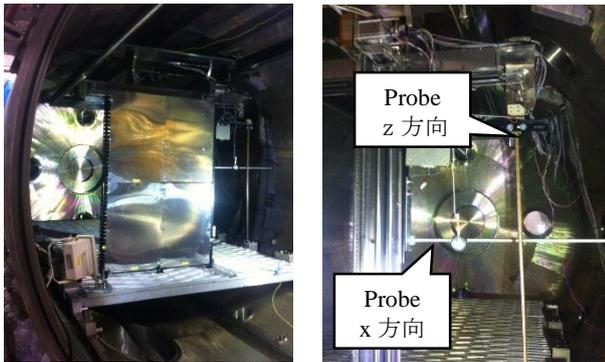


図7. チェンバ内に設置した金属壁(左)及び密度境界面に対し平行(z方向), 垂直(x方向)に設置したインピーダンスプローブ(右)

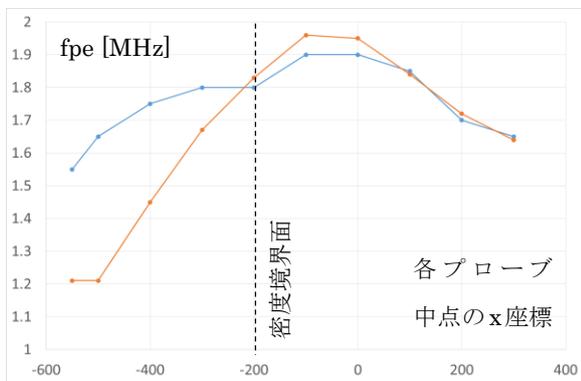


図8. 密度境界面に平行なプローブ(z方向・橙)および垂直なプローブ(x方向・青)による電子密度計測値

5. まとめ

2014年度の実験(2014年5月13~15日, 2015年1月5~8日)において, 3項目の実験を実施し, 以下の結果を得た.

1. 観測ロケット S-520-29号機搭載用インピーダンスプローブ(NEI)のプラズマ計測実験を行い, 所期の電子密度計測性能を有することを確認した. このNEIは2015年8月17日の観測において観測目的とする Sporadic-E層の電子密度高度分布の計測に成功した.

2. 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ができた.

3. 観測ロケットのウェイク境界付近での電子密度計測値を適切に解釈するため, チェンバ内に遮蔽壁を設置して生じた高密度・低密度領域にプローブを交差させて電子密度計測を行った. プローブ全長の半分以上がウェイク外にある場合ウェイクの影響がわずかであること, 半分以上がウェイク内にある場合はウェイク内外の影響の考慮が必要であることが示唆された.

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, Y. Katoh (2015), Observation of wake-induced plasma waves around an ionospheric sounding rocket, *J. Geophys. Res.*, in press.