

# 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低域混成共鳴の検出実験

熊本 篤志, 遠藤 研, 石ヶ谷 侑季 (東北大)

## Experiment of lower hybrid resonance detection by wideband impedance probe for measurement of ion composition and electron number density

A. Kumamoto, K. Endo, Y. Ishigaya (Tohoku Univ.)

### 1. はじめに

本研究では, 2016年8月30日~9月2日, および2017年2月13~17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, 広帯域インピーダンスプローブの試作モデルによるプラズマ計測実験を実施した. 2016年度は特にプローブ・プラズマ間を流れる DC 電流成分を抑制することで, LHR 検出を妨げる電子衝突周波数の低減に効果がないかどうかを確認するために, プローブへの DC 電圧印可を試みた.

### 2. 広帯域インピーダンスプローブによる LHR 検出の原理

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. 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  $\omega_{LH}$  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,  $\Omega_e$  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,  $\Pi_s$  は粒子  $s$  のプラズマ角周波数,  $\Omega_s$  は粒子  $s$  のサイクロトロン角周波数,

$v_s$  は粒子  $s$  の衝突周波数である。図 1 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 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。2017 年度冬に打ち上げ予定の SS-520-3 号機は、極域カスプ領域のイオンアウトフロー現象を観測対象としており、到達高度は 1000 km に及ぶ。高高度では電子の衝突周波数はさらに低く、LHR の検出にもさらに適しており、うまく計測できれば、熱的イオン・低エネルギーイオン計測とのクロスチェックにも活用できることが期待される。そこで、SS-520-3 号機に搭載される NEI/PWM (インピーダンスプローブ及び高周波プラズマ波動モニター) には、広帯

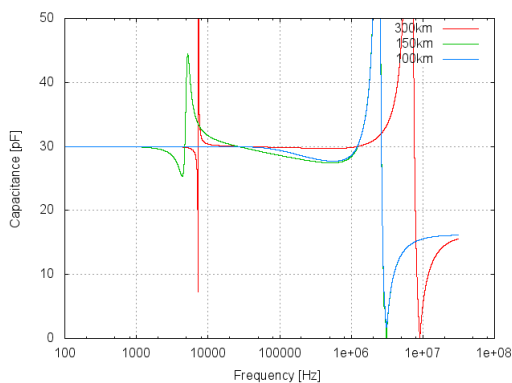


図 1. 高度 100km, 150km, 300km の電離圏で観測されるプラズマ中のプローブ容量の計算値

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

域インピーダンスプローブ機能を実装することを予定している。2017 年 2 月の実験では、2016 年度前半に製造した SS-520-3 用 NEI/PWM の試作機を用いて、より搭載時に近いプラズマ計測試験を行った。本稿では、2017 年度 2 月の実験結果を中心に報告する。

### 3. 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

2017 年 2 月の実験では、SS-520-3 用 NEI/PWM の試作機が用いられた。NEI/PWM 試作機の計測周波数帯は 0.1~25MHz 又は 1~10kHz (切替式) でいずれも掃引周期は 125ms である。NEI/PWM 試作機では、プローブの DC 電圧印可機能を実装していないため、実験では図 2 のブロック図に示すように、チェンバ本体を基準電圧 0V として、これに対し直流電源装置で  $V_{COM2}[V]$  の DC 電圧を生成する。NEI/PWM の 1 次電源 GND は 0V に接地し、2 次電源 GND を  $V_{COM2}$  に接続する。プローブと 2 次電源間には抵抗 (10MHz) で接続されているため、電流が流れなくなったところでプローブ電位  $V_P$  は  $V_{COM2}$  と一致することが期待される。この NEI/PWM 試作機を、接地系統に注意しつつ、チェンバ内に固定設置した。また比較用に従来型のインピーダンスプローブも並べて設置した (図 3)。真空引きした後、Ar ガスを導入して後方拡散プラズマ源で電離させるとともに、ヘルムホルツコイルに電流を流して、チェンバ内に 70000 nT (電子サイクロトロン周波数: 1.96 MHz) の背景磁場を発生させた。この状態で  $V_{COM2}$  を 0.0, 0.5, 1.0, ..., 4.0 V のように変化させ、0.1~25 MHz の帯域での計測データ、1~10kHz の帯域での計測データを確認した。

図 4 に  $V_{COM2} = 0 \sim 4 V$  の時の 0.1~25 MHz の等価容量プロファイルを y 軸をずらしながら重ねたプロットを示す。0.1~25 MHz の帯域では、従来型のインピーダンスプローブと同様に UHR による等価容量の極小、シースレゾナンスによる等価容量の極大を確認することができる。図 4 の計測例では、UHR 周波数は 2.75 MHz で、これよ

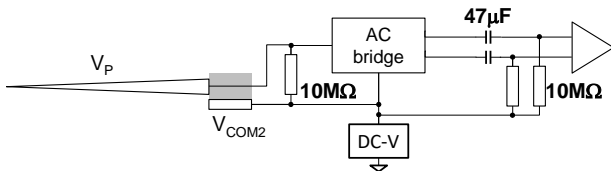


図 2. NEI/PWM 試作機のブロック図

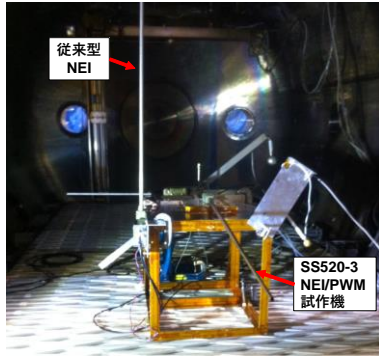


図 3. チェンバ内での設置状況

りプラズマ周波数が 1.93 MHz, 電子数密度が  $4.6 \times 10^4$  /cc だったことがわかる. また, いずれの  $V_{COM2}$  でも, UHR 周波数, シースレゾナンス周波数, 等価容量値の平均・分散に大きな差は見られなかった.

図 5~7 に  $V_{COM2} = 0.0, 1.5, 3.0$  V の時の 1~10 kHz の等価容量プロファイルを示す. 0.1~25 MHz の帯域の計測で得られた電子数密度  $4.6 \times 10^4$  /cc をもとに,  $Ar^+$  100% として LHR 周波数を求めると 5.3 kHz であるが, 図 5~7 の等価容量プロファイルでは, この周波数付近の極小を確認することができなかった. また  $V_{COM2}$  の変化に対して, 等価容量プロファイルの分散が  $V_{COM2} = 0.0$  V, 3.0 V で大きいのに対し,  $V_{COM2} = 1.5$  V では最

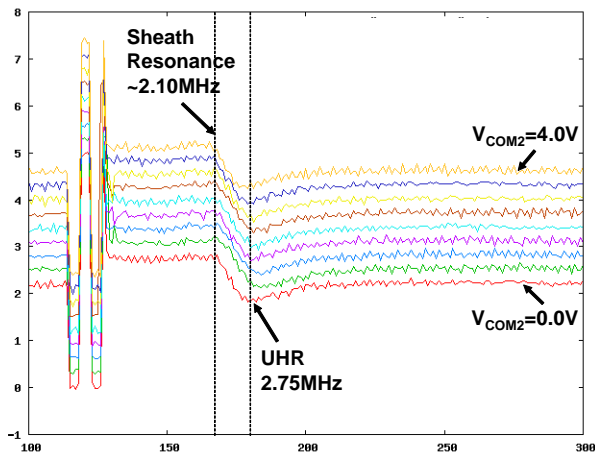


図 4. 0.1~25 MHz の等価容量プロファイル

小となる傾向が確認された. 等価容量の分散は, プロブに流れるノイズ電流によるものと推測される.  $V_{COM2} = 1.5$  V で最小になるのは, プロブ電位がプラズマ中で 1.5V だったために,  $V_{COM2} = 1.5$  V の際に 10 MΩ を流れる電流が最小となっていたことを示している.

図 4~7 の計測では, NEI/PWM 試作機による電子数密度計測で, 問題を生じなかったが, 後方拡散プラズマ源の設定を変更して, より高密度の Ar プラズマを生成して計測を試みたところ, NEI/PWM 試作機の実出力データが飽和する場所が見られた. 一方, 比較用の従来型インピーダンスプローブではこの現象は見られなかった.

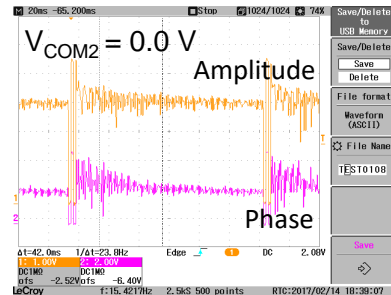


図 5. 1~10 kHz の等価容量プロファイル ( $V_{COM2} = 0.0$  V)

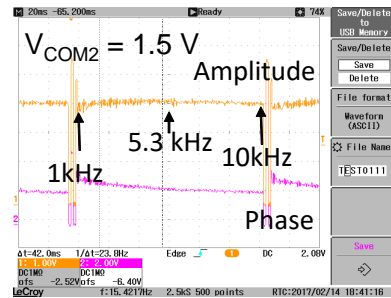


図 6. 1~10 kHz の等価容量プロファイル ( $V_{COM2} = 1.5$  V)

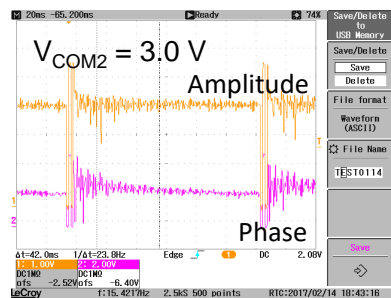


図 7. 1~10 kHz の等価容量プロファイル ( $V_{COM2} = 3.0$  V)

#### 4. 考察

今回の実験では、プローブと NEI/PWM 試作機の 2 次電源 GND が 10 M $\Omega$  で接続されていることから、プローブ・2 次電源 GND 間の電荷移動は速やかに終了し、プローブの DC 電位  $V_P$  は基本的に  $V_{COM2}$  に追随するものと期待していた。真空中のプローブに対してはそうした挙動が期待できるが、プラズマ中のプローブは、周辺プラズマとの間で電荷の移動が生じるために、むしろ  $V_P$  はもっぱら背景プラズマの密度・温度等に依存して決まり (図 5~7 のプラズマ中では 1.5 V)、 $V_P - V_{COM2}$  間の電位差に応じて 1~10 kHz の周波数帯では 10 M $\Omega$  にノイズ電流が流れていたものと考えられる。また 0.1~25 MHz の帯域の計測で  $V_{COM2}$  を変化させてもシース周波数の変化が見られなかったことも、プローブの DC 電圧・周辺プラズマの状態が不変であったことを裏付ける。

本実験では、上述の  $V_{COM2}$  でプローブ電位が有効に制御できていなかった問題に加えて、広帯域化した NEI/PWM 試作機でのみ発生する出力データ飽和の問題が明らかになった。発生状況の詳細を確認した結果、飽和の直接的な原因はアナログ部の最終出力が A/D の入力レンジを超えるような大きな DC 成分を持っていることによるもので、この大きな DC 成分の原因をたどると、フロントエンドの容量ブリッジの出力をピックアップする差動アンプの入力側に置いた RC LPF (従来型 NEI では 0.1  $\mu$ F, 10 M $\Omega$ , 時定数: 1 秒) を過大に低周波化 (47  $\mu$ F, 10 M $\Omega$ , 時定数: 470 秒) しており、プラズマ中でプローブがもつ DC 電位を実質的にカットできていなかったための事象であることが判明した。従来型 NEI でも 1 kHz の信号は十分通すので、RC LPF は従来型 NEI のものに戻すこととした。

#### 5. 結論

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、SS-520-3 に搭載予定の NEI/PWM 試作機によるプラズマ計測実験を実施した。特にプローブ・プラズ

マ間を流れる DC 電流成分の抑制・LHR 検出を妨げる電子衝突周波数の低減の効果有無を確認するために、NEI/PWM の 2 次電源 GND に DC 電圧を印可する方式で、プローブの DC 電位制御を試みたが、プローブ電位がもっぱら背景プラズマの条件によって決定されることから、この方式は (プローブ電位の決定には有効だが) プローブ電位の制御には適当でないことが判明した。また、プローブ電位が DC 電位を持つことによって、大気中の実験では気づかないような広帯域化の設計変更に伴う不具合を発見することができた。

2017 年度の実験では、プラズマ計測実験を通じて、SS-520-3 号機フライト機の機能・性能検証を進め、かみ合わせ試験・射場運用に万全を期し、電離圏で初の LHR 検出によるイオン組成計測の実現を目指す。また、2016 年度の実験で達成に至らなかったプローブの DC 電位制御に引き続き取り組む。容量ブリッジの印可信号に DC 電圧を付加する方式を検討している。

#### 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、岩倉優太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.