

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 年度に引き続き, 2017 年 4 月 25~27 日, および 2017 年 8 月 28 日~9 月 1 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 年度にはプローブ・プラズマ間を流れる DC 電流成分を抑制することによる低域混成共鳴 (Lower hybrid resonance; LHR) 検出を妨げる電子衝突周波数の低減効果を期待して, 試作モデルのプローブに DC 電圧を印可する実験を行ったが, 明確な効果は認められなかった. 但し, 2016 年度の実験ではフロントエンド回路の時定数や印可電源に対するプローブ電位の追従性に問題があったため, 2017 年度はこの点を改良した試作モデルで試験に臨んだが, 2016 年度同様, 印可電圧に関わらず, LHR 検出には至らなかった. 併せて, 2017 年 4 月 25~27 日の実験では, SS-520-3 号機搭載用 NEI/PWM (インピーダンスプローブ・プラズマ波動観測装置) の環境試験・機能/性能試験の一環として真空中動作確認・プラズマ計測機能確認を実施した. 本稿では, 2017 年度までの DC 印可効果の確認結果のサマリーと SS-520-3 号機搭載用 NEI/PWM の試験結果を中心に報告する.

2. 広帯域インピーダンスプローブによる LHR 検出の原理

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.

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

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[1,2].

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

$$K_{\perp} = 1 - \sum_s X_s U_s / (U_s^2 - Y_s^2) \quad (3)$$

$$K_{\parallel} = 1 - \sum_s X_s / U_s \quad (4)$$

$$X_s = \Pi_s^2 / \omega^2 \quad (5)$$

$$Y_s = \Omega_s / \omega \quad (6)$$

$$U_s = 1 - i\nu_s / \omega \quad (7)$$

また 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 の各プローブ容量プロファイルは, 表 1 のパラメータを式(1)~(7)に代入して得られる. 数 MHz 帯に見られるプローブ容量の極小が, 高域混成共鳴 (Upper hybrid resonance; UHR) に対応し, 数 kHz 帯に見られるプローブ容量の極小が LHR に対応する. 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.

$$\omega_{LH} = \sqrt{\frac{\Pi_{O^+}^2 + \Pi_{NO^+}^2 + \Pi_{O_2^+}^2}{1 + \Pi_e^2 / \Omega_e^2}} \quad (8)$$

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. このように LHR 周波数はイオン密度・組成に依存するので, UHR 検出を目的とした従来型インピーダンスプローブの動作周波数帯域 (0.1~25MHz) の下限を数 100 Hz まで引き下げ LHR 周波数でのプローブ容量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. 但しここで電子の衝突周波数の影響に注意する必要がある. 衝突周波数が高いために, 高度 100 km では LHR 周波数での極小を識別できないが, 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. 2018 年度以降打上予定となった 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 の検出にも適している. 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. そこで, SS-520-3 号機に搭載される NEI/PWM には, 広帯域インピーダンスプローブ機能を実装している. 一方, チェンバ内では衝突周波数を 1kHz 以下に抑えられないため, 室内実験での LHR は基本的には困難であると考えられてきた.

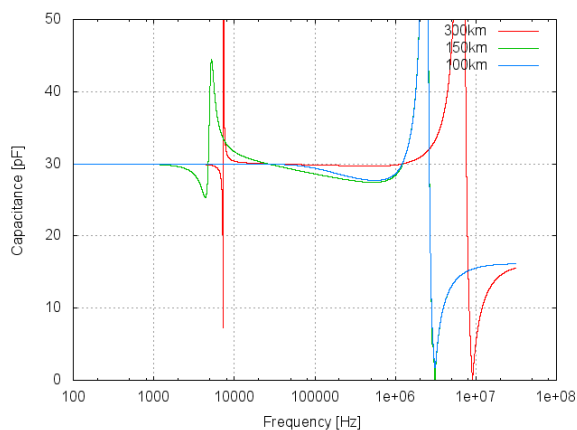


図 1. 高度 100km, 150km, 300km の電離圏で観測されるプラズマ中のプローブ容量の計算値

表 1. 図 1 の計算で使用したパラメータ

Region	E	G	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

3. 広帯域インピーダンスプローブ試作機によるプラズマ計測実験

2016 年度・2017 年度の実験では, 計測周波数帯 0.1~25MHz 及び 0.3~20kHz (交互掃引) の広帯域インピーダンスプローブ試作機が用いられた. DC 電圧印可のためのフロントエンド部 (但し 2017 年度改良版) のブロック図を図 2 に示す. 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. この状態でプローブ電位 V_{COM2} を -9.0, -7.5, ..., 0.0, ..., +7.5, +9.0 V のように変化させ, 0.1~25 MHz, 0.3~20kHz 各帯域でのプローブ容量プロファイルを確認した.

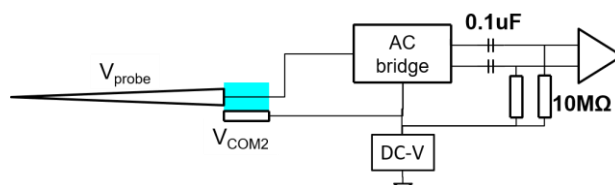


図 2. NEI/PWM 試作機フロントエンド部のブロック図

図 3~5 に $V_{COM2} = 0.0, 1.5, 3.0$ V の時の 1~10 kHz のプローブ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 $4.6 \times 10^4 / \text{cc}$ をもとに, $Ar^+ 100\%$ として LHR 周波数を推定すると 5.3 kHz であるが, 図 3~5 に示

すように、いずれの印可電圧においても、この周波数付近のプローブ容量極小を確認することができなかった。また、後方拡散プラズマ源で生成した He^+ 、大型紫外光源で生成した C_3H_6 イオンでも同様の計測を行ったが LHR の確認には至らなかった。

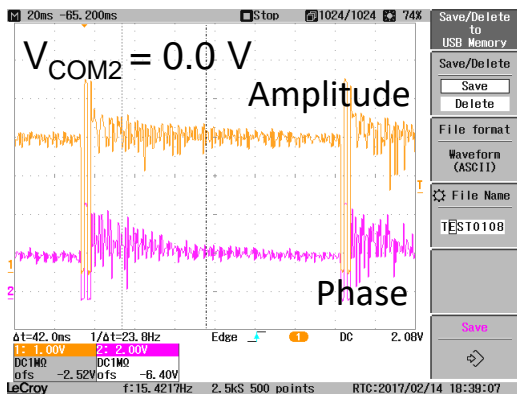


図 3. 1~10 kHz のプローブ容量プロファイル ($V_{\text{COM}2} = 0.0 \text{ V}$)

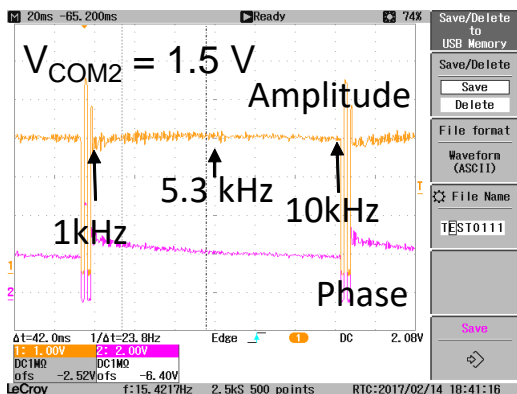


図 4. 1~10 kHz のプローブ容量プロファイル ($V_{\text{COM}2} = 1.5 \text{ V}$)

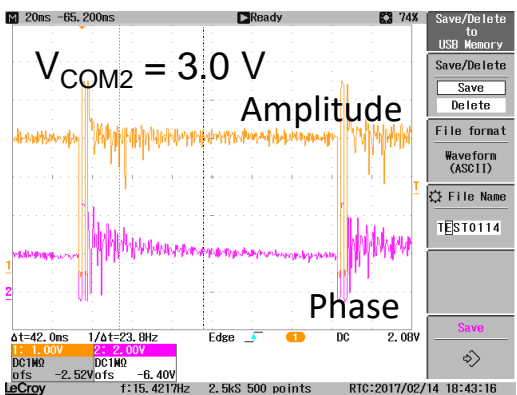


図 5. 1~10 kHz のプローブ容量プロファイル ($V_{\text{COM}2} = 3.0 \text{ V}$)

4. SS-520-3 搭載用 NEI/PWM プラズマ計測試験

チェンバ内での LHR 検出は、電子の衝突周波数低減が難しいため、広帯域インピーダンスプローブの動作実証・改良は、フライトを通じて進めていく必要がある。そこで SS-520-3 号機の観測では、NEI/PWM 動作周波数下限を 1kHz に引き下げることで、インピーダンスプローブによる初の LHR 検出に取り組むことを予定している。2017 年 4 月 25~27 日の実験では、SS-520-3 搭載用 NEI/PWM によるプラズマ計測実験・真空中動作試験を実施した (図 6)。試験時の NEI 振幅・位相データを図 7 (0.1~25MHz)、図 8 (0.3~20kHz)、PWM スペクトルデータを図 9 (モノポールモード)、図 10 (ダイポールモード) に示す。1.3MHz 付近にプローブ容量極小が計測されており、従来型 NEI と同様、UHR の検出性能に問題がないことを確認できる。一方、チェンバ内のプラズマでは衝突周波数が高いため、0.3~20kHz の帯域内で LHR に対応するプローブ周波数極小は確認できておらず高衝突周波数での平坦なプローブ容量プロファイルの確認にとどまった。PWM は試験時にはチェンバ外から信号を入力して真空中での機能・性能確認を実施した。搭載時には低周波波動解析装置 (LFAS) の共用アンテナ・プリアンプから信号を受け取る。

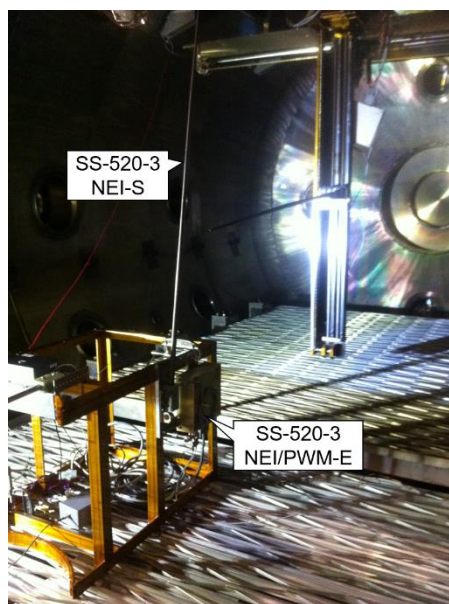


図 6. SS-520-3 NEI/PWM チェンバ試験時の設置状況

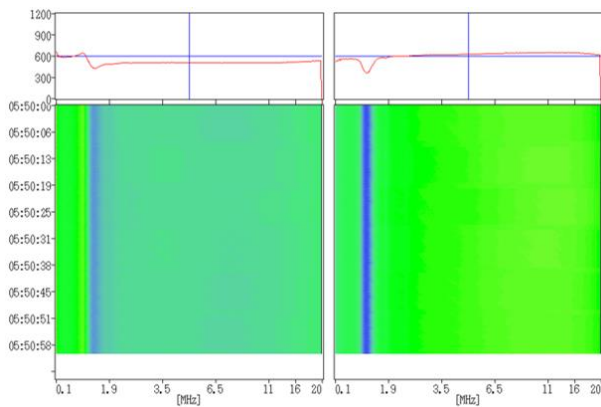


図 7. NEI 高周波数帯データ (0.1~25MHz)

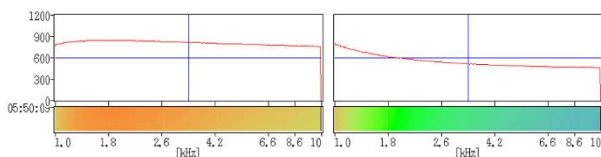


図 8. NEI 低周波数帯データ (0.3~20kHz)

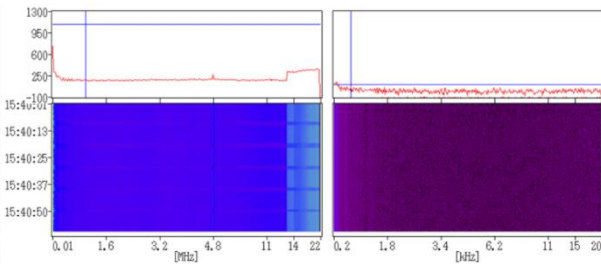


図 9. PWM モノポールモードデータ

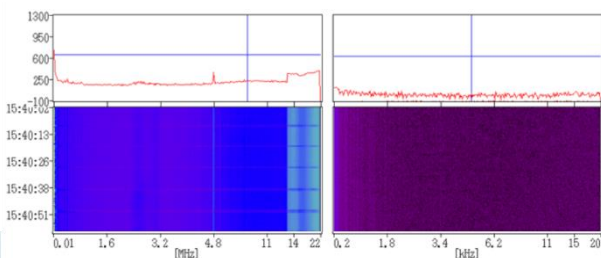


図 10. PWM ダイポールモードデータ

5. まとめ

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、LHR によるイオン組成計測を目的とした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・2017 年度に、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、低 LHR 検出を妨げる電子衝突周波数の低減効果を期待して、試作モデルのプローブに DC 電圧を印可する実験、複数のプラズマ源（後

方拡散プラズマ源・大型紫外光源）による実験を行ったが、明確な差異は認められず、残念ながらチェンバでの LHR 検出実験手法の確立には至らなかった。

今後、広帯域インピーダンスプローブによる LHR 検出・イオン組成導出の動作実証・改良を進めていくためには、観測ロケットに搭載して、電離圏での試験計測を重ねていかざるを得ない。その目的のため、SS-520-3 号機では NEI/PWM を広帯域化して下限周波数を 0.3kHz に引き下げる。2017 年 4 月 25~27 日の実験では、SS-520-3 号機搭載用 NEI/PWM の環境試験、機能・性能試験を実施し、従来型の NEI 同様に UHR 検出が可能なこと、LHR 周波数帯のプローブ容量計測が可能なこと、真空中の動作に問題がないことを確認した。SS-520-3 号機の飛行実験は、観測ロケット・バス機器の不具合により 2018 年度以降に延期されることとなったが、飛行実験の際には、上記試験を経た NEI/PWM を搭載し、電離圏高度でインピーダンスプローブによる初の LHR 検出を試みることを予定している。

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 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.