

マイクロ波放電式中和器内部の 回転スポークに関する実験的研究

学生証番号 47-176087 氏名 吉竹 大志
(指導教員 小泉 宏之 准教授)

Key Words: Electric propulsion, Microwave discharge neutralizer, Langmuir probe

1. 序論

近年、100 kg 以下の超小型人工衛星の打ち上げが急増しており、増加傾向は続く見込みである。[1] 超小型衛星は、コスト、開発期間の観点から積極的な新技術の導入・実証、より高難度のミッションへの挑戦、短期スパンでの人材育成が行える。超小型衛星の台頭に伴い、高比推力のイオンスラスタを搭載する動きもある。小型のイオンスラスタは 2014 年の「ほどよし 4 号」や「PROCYON」に搭載され、宇宙実証を達成している。[2]

イオンスラスタはイオン源と中和器からなり、イオン源から加速されたイオンが、中和器から同数の電子が放出される。中大型向けのイオンスラスタでは、中和器としてホローカソードを用いている。ホローカソードは電子源となる含浸電極と引き出し電極からなり、含浸電極が大気暴露に弱いなど欠点がある。そのため、小型のイオンスラスタには含浸電極を持たず構造がシンプルで長寿命、かつ小型化に向くマイクロ波放電式の中和器が用いられている。

平本らは三次元 PIC 計算によってマイクロ波放電式中和器の電子引き出し機構に関する調査を行った。[3] 中和器の内部に、時間変化する電場の周方向回転を見出し、周方向のストライプ構造から生ずる局所的な電場勾配と、半径方向に印加されている磁場との $E \times B$ ドリフトによって、軸方向へ電子が輸送される。

本研究では、平本らによって認められた中和器内部の回転現象を実験的手法によって調査し、回転現象と電子温度、プラズマ電位、電子・イオン密度との相関を調べることを目的とする。

2. 実験装置・実験方法

中和器内部の現象解明のため、5 本のシングルプローブを用いた。図 1 に中和器とプローブの様子を示す。中和器内部には ECR 加熱と電子閉じ込めのための磁石とマイクロ波投入のためのアンテナがあり、下流側に中性粒子閉じ込めのためのオリフィス板がある。プローブは、SUS 製の中心導体が径 0.3 mm、セラミック製の絶縁管が径 1.0 mm の面プローブである。角度は 12 時方向から時計回りに 0°, 45°, 100°, 180°である。プローブの測定は

オシロスコープを用いた。フロート電位およびプローブ電流の時間変化を測定した。

実験に用いた装置の概要を図 2 に示す。中和器は真空チェンバ内で背圧 6.0×10^{-3} Pa 以下で作動させた。中和器の電子回収用にコレクタを設置した。実験時の各装置のパラメータを表 1 に示す。

表 1 実験時のパラメータ。

マイクロ波電力 / W	0.3, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5
Xe ガス流量 / ($\mu\text{g/s}$)	5.0, 7.5, 10.0, 12.5
コレクタの電圧 / V	0
プローブ電圧 / V	-100 to 100

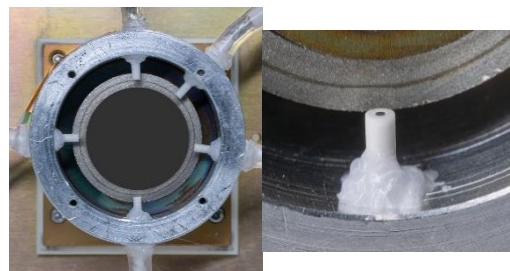


図 1 中和器の内部構造(左)とプローブ(右)。中和器は下流側のオリフィスが外されている。

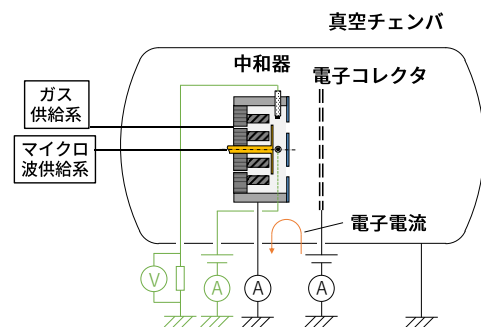


図 2 実験装置概要。

3. 実験結果と考察

測定したフロート電位の時間変化を図 3 に示す。それぞれのプロットはプローブの幾何的位相を示す。また、0°プローブのフロート電位の測定値に FFT をかけたものを図 4 に示す。ピークの周波数は 48 kHz, 96 kHz, 143 kHz, 191 kHz と順に続き、主ピークの n 倍を満たす。FFT の結果から、20 kHz–1 MHz を残して低周波成分と高周波

成分を除去したものに對し、 0° – 180° プローブの波形の位相差を算出すると、 42.2° , 98.7° , 151.5° となり、おおむねプローブの幾何的位相と一致する結果が得られた。

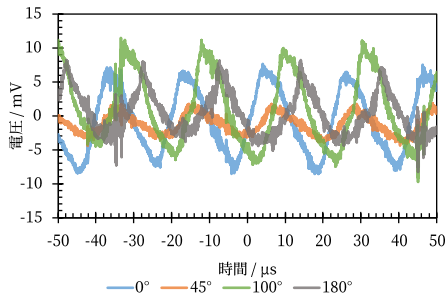


図 3 フロート電位の時間変化。

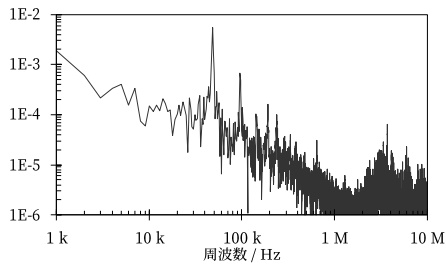


図 4 0° プローブのフロート電位の FFT 結果。

周方向にピークを 1 個持ち、周波数が 48 kHz と分かったため、角周波数 $\omega = 3.02 \times 10^6$ rad/s、角波数 $k = 143 \text{ m}^{-1}$ が得られた。プラズマ中の代表的な波の分散関係に当てはめてみると、イオン音波あるいは静電イオンサイクロトロン波に合致することが示唆された。[4] なお、分散関係の計算に用いた電子温度や密度はグローバルモデル (GM) により求めた。

マイクロ波とガス流量を掃引し、電子温度や密度を変化させたときのフロート電位の波の周期や振幅とイオン音波を仮定し GM から算出した周期を比較したものを図 5、図 6 に示す。マイクロ波電力の増加に伴い振幅も増加した。GM から算出した周期と実験値を比較すると定性的な傾向が一致した。

プローブに電圧を印加し、プローブ電流を測定することで電子温度とイオン密度の変動を調べた。結果を図 7、図 8 に示す。横軸はフロート電位の波長であり、時間は $20 \mu\text{s}$ である。ともに 3–4 こぶ程度の振動が混ざっているが、これは、実験時に混入したノイズであると考えている。この周期の振動はプラズマの有無によらず電流測定時は観測されており、図 4 のように主ピークの n 倍の位置ではない周波数であることが根拠である。結果より、電子温度の時間変化は小さく、イオン密度の時間変化は大きいことが分かる。しかし、フロート電位の振幅から、イオン密度と電子密度が連動して変動している可能性が示された。

4. 結論

本研究では、中和器内部の回転現象の実験的解明を試みた。フロート電位の測定により、中和器内部で円周に

対して 1 ピークの進行波が観測され、イオン音波の分散関係に近いことが分かった。また、プローブ電流の測定により、電子温度よりもイオン密度の変動が大きい、イオン密度と電子密度が連動している可能性が示された。

参考文献

- Williams, C., *et al.*, “2018 Nano/Microsatellite Market Forecast,” SpaceWorks, 2018.
- Funase, R., Koizumi, H., *et al.*, “50kg-Class Deep Space Exploration Technology Demonstration Micro-pacraft PROCYON,” 28th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2014.
- Hiramoto, K., Nakagawa, Y., *et al.*, “Effects of E3B drift on electron transport across the magnetic field in a miniature microwave discharge neutralizer,” Physics of Plasmas 24, 064504, 2017.
- Chen, F. F., “Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion,” Plenum Press, 1984.

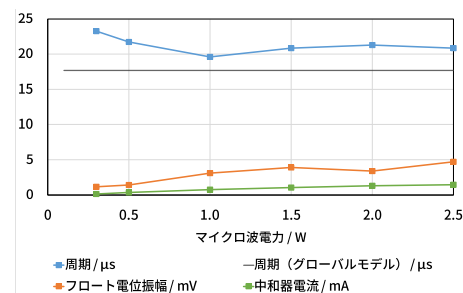


図 5 マイクロ波電力を掃引したときの周期、振幅。

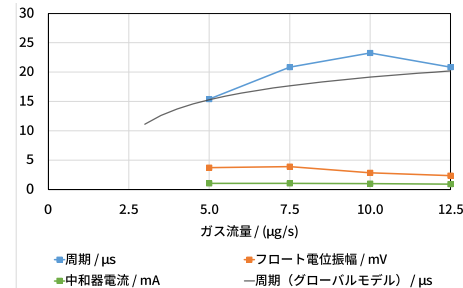


図 6 ガス流量を掃引したときの周期、振幅。

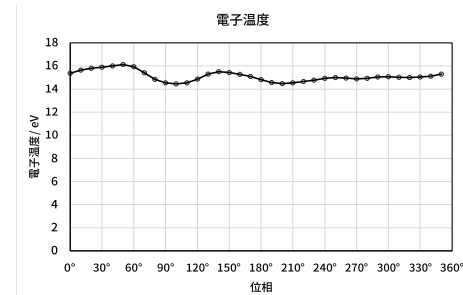


図 7 電子温度の変動。

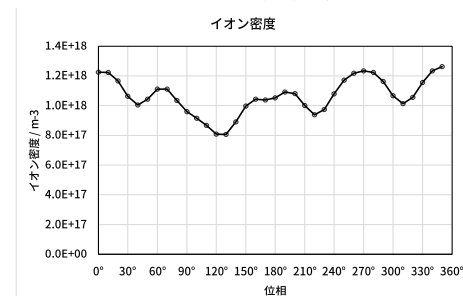


図 8 イオン密度の変動。