

宇宙研における高密度ヘリコンプラズマ実験

谷川 隆夫*, 篠原 俊二郎**, 船木 一幸***, 山際 啓一郎****

High-Density, Helicon-Plasma Experiment at ISAS/JAXA

Takao TANIKAWA*, Shunjiro SHINOHARA**, Ikkoh FUNAKI***,
and Keiichiro YAMAGIWA****

Abstract: High-density, helicon-plasma experiment using a large-volume (73.8 cm in diameter and 486 cm in axial length) helicon-plasma device at ISAS/JAXA is described. In certain applications, such as, plasma processing and plasma thrusters, a large-diameter plasma with short length is desirable in order to reduce the power requirement for plasma production. It is demonstrated using the ISAS/JAXA helicon-plasma device that a reasonably good plasma production efficiency can be achieved even for the helicon-plasma with ~80 cm length. The Ar plasma density can exceed 10^{12} cm^{-3} with moderate rf input power of ~700 W (at 7 MHz). Ongoing experiments to simulate space-plasma phenomena are also briefly described. In these experiments, full device length is normally utilized.

Key words: Helicon-plasmas; Large-diameter plasmas; Space plasmas; rf produced plasmas; Space plasma simulation experiments

1. はじめに

ISAS/JAXA スペース・プラズマ共同研究設備の高密度磁化プラズマ発生装置を大容量・高密度ヘリコンプラズマ装置にセットアップし直し実験を進めてきている。ステンレス・スチール製真空容器のエンドフランジ上の大口径クウォーツ・ガラス窓の外側に設置されたフラット・スパイラル・アンテナを使用することにより、極めて高効率でプラズマを生成することに成功している。装置の詳細については昨年報告書など [1 - 6] に記載されているのでそれらの文献を参照されたい。この装置はもともとスペース・プラズマ現象の実験室シミュレーションを念頭に整備されてきたものだが、ヘリコンプラズマ装置に改造されて以来、その高性能故にプラズマ・プロセス、電気推進分野など様々な応用分野からの期待も大きい。殊に前記の分野では大口径プラズマは望まれているが、プラズマ容積が大きいことは放電にパワーを浪費することになり逆に不利である。従って、容積自体は低く抑えたいという要望がある。そこで本稿では、最近実施した装置内にほぼ断面にわたる大きな終端電極を設置することでプラズマ実効長を意識的に短くしたプラズマ生成実験について簡単に紹介する。

現在準備が進められている、通常は装置の全長を使う、スペース・プラズマ中に生じる非線形波動現象の実験室シ

* Tokai University
** Kyushu University
*** ISAS/JAXA
**** Shizuoka University

ミュレーション実験についても簡単に述べる。

2. 実験方法

プラズマ実効長を短くするための終端電極 (Termination-plate, 可動である) を設置した大容量 - 高密度ヘリコンプラズマ装置の概略図を図 1 に示す。真空容器は, 外径 75 cm, 内径 73.8 cm, 長さ 486 cm の円筒形である。本報告で紹介する実験結果は, 終端電極の位置がアンテナ側エンドフランジからの距離 $z = 81$ cm である場合についてである。終端電極は直径約 5 mm の穴が数多く開いたパンチメタル (ステンレス・スチール製) を用いて製作した。電極は浮動電位である。測定用ラングミュア・プローブの軸方向位置は $z = 48$ cm であるが, この位置はプラズマ密度の軸方向分布がほぼピーク値をとる位置に相当する。使用したガスはアルゴン (Ar, ガス圧 = 2.0 mTorr) である。

メイン磁場強度はいろいろ変えることができるが, 真空容器端にあるポンプステーションの関係でアンテナ付近の磁場を補うための補正磁場コイル (図 1 の Separate Field Coils) とメイン磁場コイル群の右端のコイルとの間に大きなギャップがあるためプラズマ生成部における磁場は非一様である。補正磁場コイル電流 $I_s = 15$ A の場合, アンテナ位置における磁場強度は約 40 G である。

使用したフラット・スパイラル・アンテナ

は直径 43 cm, 4 ターンのもので, 本実験ではフル 4 ターンを使用しており, 高周波増幅器の高電圧側をアンテナ中心に, グラウンド側をアンテナ最外周部につないである。使用周波数は 7 MHz であり, 放電は繰り返し頻度 1 Hz, 放電長 40 ms のパルス放電である。これは主に高密度モードに入った場合の熱対策がプローブに対してなされていないためである。

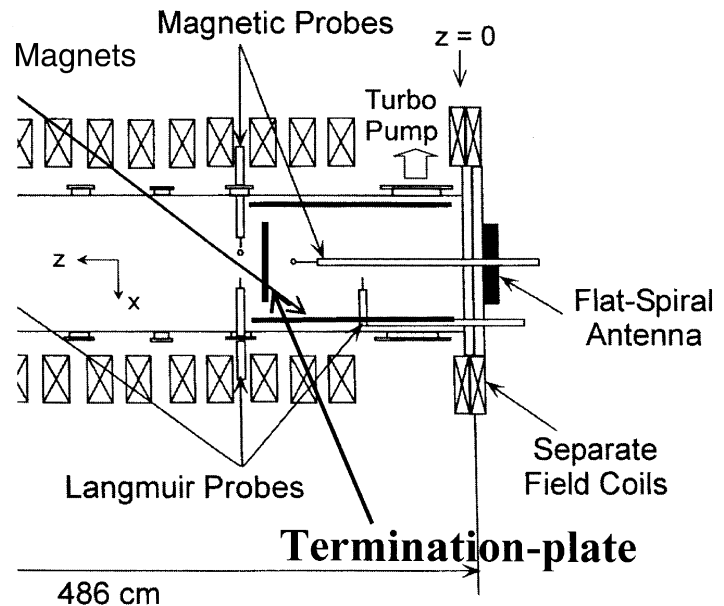


図 1 プラズマ長を短くするための終端電極 (Termination-plate) を設置した大容量 - 高密度ヘリコンプラズマ装置。

3. 実験結果 及び 考察

電子密度 n_e が入力 rf パワー P_{inj} を上げるに連れどのように上昇するかをプロットしたのが図 2 (a) である。この時のアンテナ負荷抵抗 R_t (= 真空負荷抵抗 + プラズマ負荷抵抗) の変化をプロットした結果が図 2 (b) である。良好な容量結合性により $P_{inj} \approx 1$ W で $n_e \sim 5 \times 10^9$ cm⁻³ 級のプラズマが生成されている。rf パワーを上げるにつれ容量結合性プラズマから誘導結合性プラズマに移行していると考えられる。 $P_{th} \approx 700$ W で密度ジャンプが生じ, $P_{inj} > P_{th}$ でヘリコンプラズマ (HP) モード ($n_e \geq 10^{12}$ cm⁻³) になったと考えられる。詳しい波動測定をまだ実施していないのでヘリコンモードと確言はできないが, ヘリコンプラズマに特有の所謂ブルーモード発光が見られる。この高密度モードに移行すると同時に R_t も急激に上昇し, rf パワーが良好にプラズマに吸収されている, 即ち放電効率が突然に著しく向上したことが分かる。 $P_{inj} \approx 4$ kW で $n_e \approx 8 \times 10^{12}$ cm⁻³ という高密度プラズマが生成されていることが分かる。因みに, 電子温度は約 3 eV であった。

N_e を装置内の全電子数 (平均電子密度 × プラズマ体積) として, プラズマの放電効率を N_e/P_{inj} で表現すると, 最高プラズマ密度を達成したデータについて, $N_e/P_{inj} \sim 10^{14}$ W⁻¹ となる。この値は真空容器の全長 (486 cm) を使用した

場合の値より約1桁小さい。プラズマ長が短くなりエンドロスが増大した分放電効率が減少したわけである。それにしても生成効率としてはかなり良好といえる。

図2を見ると、メイン磁場強度を大幅に変化させても放電特性に大きな差が見られない。これは、本実験のプラズマ生成領域の大部分は磁場コイルが無い領域であり、アンテナ付近の補助磁場強度が小さいためにプラズマ生成領域の磁場プロファイルを有意に変化させることが出来なかったためと考えられる。2007年1月に新しい補助磁場コイル(アンテナ付近の最大磁場強度360 G)が設置されたので、この辺りの磁場プロファイル依存性を今後より詳細に調べることができるであろう。

電子密度 n_e の径方向プロファイルを高密度モード及び低密度モードの場合について図3に示す。高密度モードの場合、中心にピークを持つほぼガウス分布型形状であるが、低密度モードの場合にはアンテナの外側2ターンに相当する辺りに山を持つ中心付近がくぼんだ凹型形状である。この状況はプラズマの発光からも認められる。

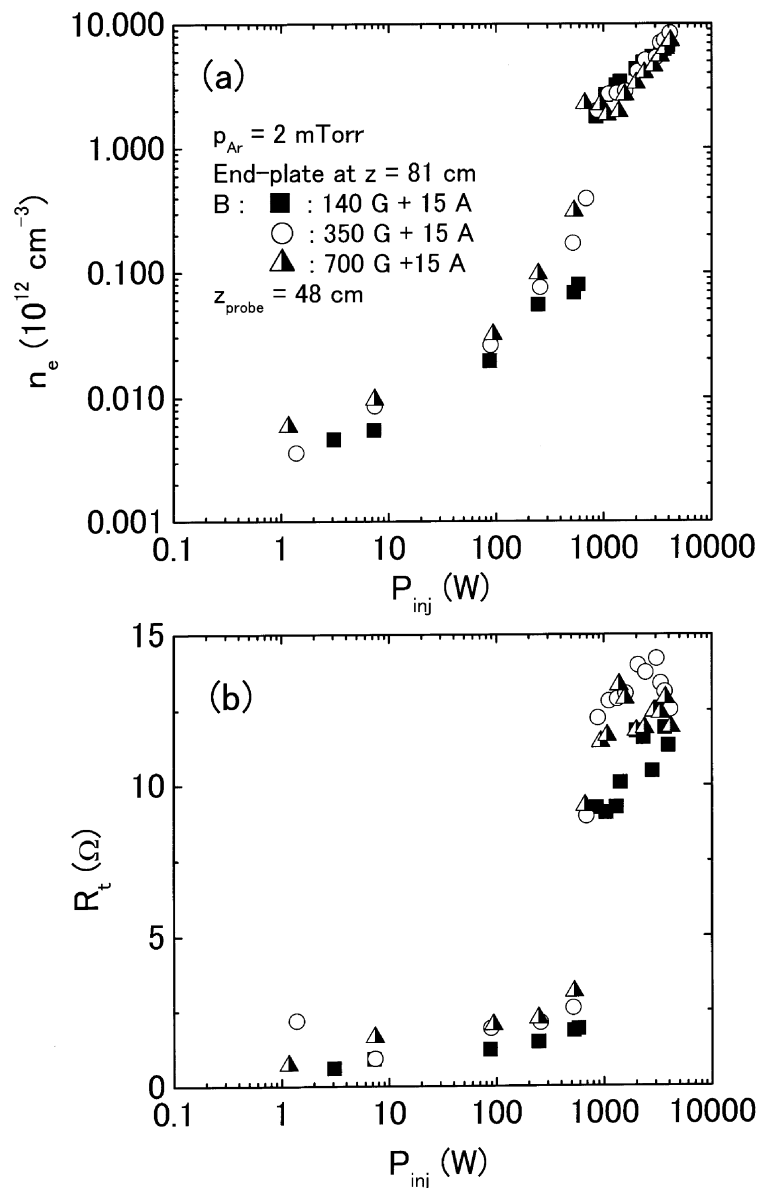


図2 プラズマ実効長を短くした場合(終端電極位置: $z = 81$ cm)のArプラズマ放電特性。
 (a): $z = 48$ cm, $r = 0$ cmにおける電子密度 (n_e) の入力 rf パワー (P_{inj}) 依存性。
 (b): アンテナ負荷抵抗 (R_t) の P_{inj} 依存性。

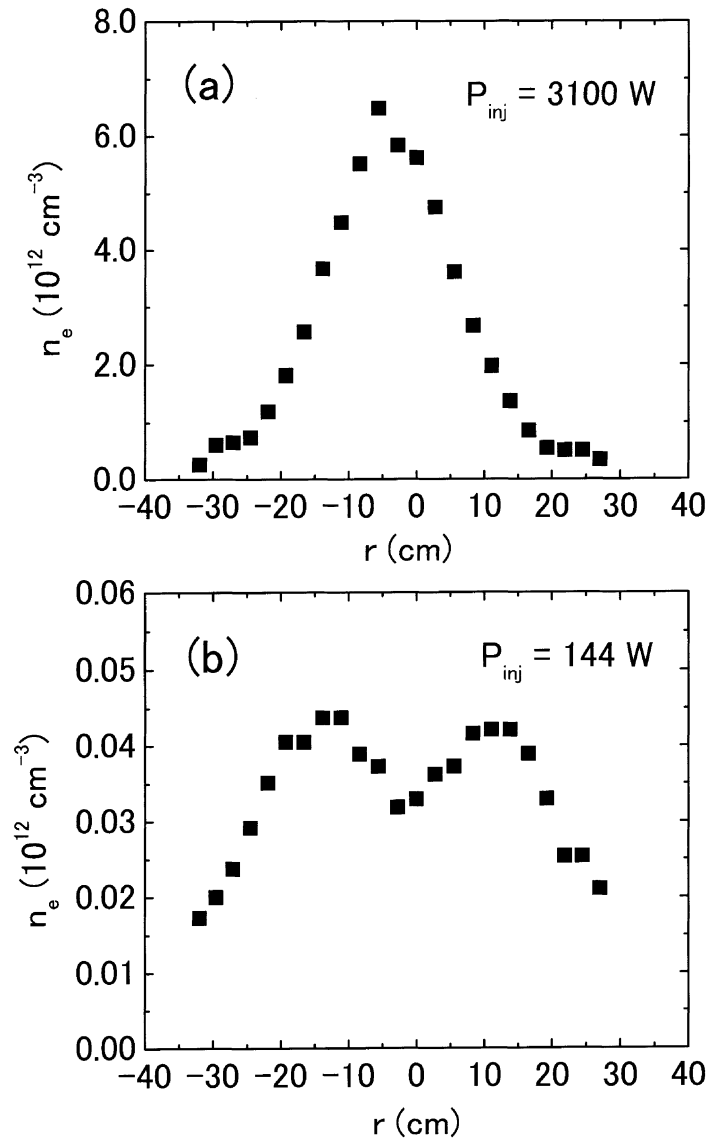


図3 電子密度の径方向プロファイル。
 (a): 高密度領域 (ヘリコン・モード) の場合。
 (b): 低密度領域の場合。終端電極位置: $z = 81 \text{ cm}$, プローブ位置: $z = 48 \text{ cm}$,
 Ar 中性圧: 2.0 mTorr , 磁場強度: $B_{main} = 140 \text{ G} + I_s = 15 \text{ A}$

4. まとめ

ISAS/JAXA スペース・プラズマ共同研究設備の大容量・高密度ヘリコンプラズマ装置を使って、様々な応用を視野に、大型終端電極を用いてわざと実効的プラズマ長を短くした場合について rf プラズマ生成実験を行った。現有の高周波増幅器の最大出力パワーはパルス・モードで約 5 kW であるが、Ar の場合 (ガス圧 = 2.0 mTorr), $P_{inj} = (\text{入射パワー}) - (\text{反射パワー}) = 4 \text{ kW}$ でピークプラズマ密度 $8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ を達成した。これは、プラズマ生成効率 $N_e/P_{inj} \sim 10^{14} \text{ W}^{-1}$ に相当する。

最後に、現在進行中のスペース・プラズマ中に生じる非線形波動現象の実験室シミュレーション実験 (2 課題) について簡単に述べる。

1) 低域混成波キャビトンの励起実験 [7,8]

オーロラ域電離圏や磁気圏の一部で観測される密度キャビティーに捕捉された局在化した低域混成波をシミュレートする実験である。大振幅低域混成波を効率よく励起するためにガス種としてはヘリウムを使用する。大振幅波の励

起法に工夫が必要で、複数のやり方を試みているところである。イオンは殆ど磁化されていないので、クロスフィールドのイオン加速が生じ易いと考えられる。これを検証できれば、磁気圏内に存在する電離圏起源の酸素イオンの挙動について有益な知見が得られるであろう。低域混成波キャビトン“素過程”とするプラズマ乱流状態を実現できればオーロラ粒子の加速機構の理解につながる可能性がある知見が得られることも期待できる。

2) 電子ビーム・プラズマ系におけるビーム励起波による励起ビーム電子の自己捕捉現象、及び電子の位相空間に生じる“低密度部位（ホール）”の発展を調べる実験 [9]

大口径プラズマ中に直径 15 cm 程の比較的大口径の電子ビーム源を設置して実験を行う。電子ビーム不安定性が非線形現象に発展する様子の 2 次元構造を詳細に調べる実験であり、磁気圏等で観測される静電孤立波の理解につながる重要な知見が得られると期待される。コンピューター・シミュレーション結果などとの詳細な比較が可能なデータが獲得されることも期待されている。

謝 辞

中村良治先生、小山孝一郎先生からは、準備段階から実験が軌道に乗るまで多くのご助言、ご支援をして頂きました。心より感謝申し上げます。ISAS/JAXA スペース・プラズマ共同研究の主査 佐々木進先生、副主査 阿部琢美先生、九州大学の河合良信先生からのいつも変わらぬ激励、ご支援に対して深くお礼申し上げます。その他 ISAS/JAXA の職員の方々からのご援助に感謝いたします。実験実施にあたっては、佐藤杉弥氏、竹田剛氏にも協力してもらいました。お礼申し上げます。

言うまでもなく、本研究は ISAS/JAXA のスペース・プラズマ共同研究の一環として実施されたものです。

References

- [1] 谷川隆夫, 篠原俊二郎, 船木一幸, 佐藤杉弥, 竹田 剛, “宇宙研大容量ヘリコンプラズマ装置の概要”, JAXA Special Publication, JAXA-SP-05-020, pp. 58 - 63 (2006).
- [2] 谷川隆夫, 篠原俊二郎, 船木一幸, 竹田 剛, 佐藤杉弥, “宇宙研大容量 - 高密度ヘリコンプラズマ装置の現状”, 「スペース・プラズマ研究会 平成 17 年度」論文集, pp. 104 - 107 (2006).
- [3] S. Shinohara and T. Tanikawa, “Development of Very Large Helicon Plasma Source”, Rev. Sci. Instrum. **75**, 1941 (2004).
- [4] T. Tanikawa and S. Shinohara, “Large-Volume, Helicon Plasma Source for Simulation Experiments of Space Plasmas”, *Proceedings of the 12th International Congress on Plasma Physics*, <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00002013/en>, 2004.
- [5] S. Shinohara and T. Tanikawa, “Characteristics of a Large Volume, Helicon Plasma Source”, Phys. Plasmas **12**, 044502 (2005).
- [6] T. Tanikawa and S. Shinohara, “Plasma Performance in Very Large Helicon Device”, Thin Solid Films, **506-507**, 559 (2006).
- [7] 谷川隆夫, 佐藤杉弥, 船木一幸, 篠原俊二郎, 鮑本一裕, 中村良治, “大容量 - 高密度ヘリコン・プラズマ源を用いる低域混成波ソリトンの実験”, 「スペース・プラズマ研究会 平成 15 年度」論文集, pp. 69 - 72 (2004).
- [8] 谷川隆夫, 篠原俊二郎, 竹田 剛, 山際啓一郎, “ヘリコンプラズマ中における低域混成波キャビトンの励起”, 「スペース・プラズマ研究会 平成 17 年度」論文集, pp. 96 - 99 (2006).
- [9] 竹田 剛, 山際啓一郎, 谷川隆夫, “実空間における電子ビームの自己捕捉現象と位相空間ホールの発展”, 「スペース・プラズマ研究会 平成 17 年度」論文集, pp. 26 - 29 (2006).