

# 宇宙研大容量ヘリコンプラズマ装置の概要

谷川 隆夫\*<sup>1</sup> 篠原 俊二郎\*<sup>2</sup> 船木 一幸\*<sup>3</sup>  
佐藤 杉弥\*<sup>4</sup> 竹田 剛\*<sup>5</sup>

## Helicon-Plasma Device at ISAS/JAXA

by

Takao Tanikawa\*<sup>1</sup>, Shunjiro Shinohara\*<sup>2</sup>, Ikkoh Funaki\*<sup>3</sup>,  
Sugiya Sato\*<sup>4</sup>, and Tuyoshi Takeda\*<sup>5</sup>

**Abstract:** A large-volume (73.8 cm in diameter and 486 cm in axial length) helicon-plasma device has been developed at ISAS/JAXA in order to perform various space-plasma related experiments. With the use of a large (43 cm in diameter) flat-spiral antenna located just outside a quartz-glass window at one end of the vacuum vessel, the device is capable of producing high-density plasma (gas species used so far are argon, helium, and hydrogen) of  $n_e \geq 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  with moderate rf input power of less than 1 kW (at 7 MHz), showing excellent discharge efficiency. Innovative methods of controlling the radial profile of the plasma density have also been demonstrated 1) by changing the magnetic field configuration near the spiral antenna and 2) by changing the antenna radiation-field pattern.

**Key words:** Helicon-plasma device; Spiral antenna; Space plasmas; rf produced plasmas; Density profile control

### 概 要

ISAS/JAXA スペース・プラズマ共同研究設備において、種々のスペース・プラズマ関連実験に対応できるプラズマを容易に生成可能な大容量（内径 73.8 cm、長さ 486 cm）ヘリコンプラズマ装置を開発したので、装置の概要、この装置で生成されるプラズマの特性について報告する。本ヘリコン装置では、励起アンテナとして真空容器端のクォーツ・ガラス窗外大気中に設置されたフラット・スパイラル・アンテナを使用している。ヘリコン放電の場合、 $n_e \geq 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  という高密度プラズマを 1 kW 以下の入力パワー（周波数 7 MHz）で生成可能という高効率 rf 放電を達成している。因みに、現在までに使用したガス種はアルゴン、ヘリウム、水素であり、上記高密度モードはアルゴン、ヘリウムで達成された。また、1) 励起アンテナ近傍の磁場配位を調節する、2) 励起アンテナからの電磁放射パターンを変化させる、という 2 通りの方法でプラズマの径方向密度プロファイルを容易に制御できることを見出した。

---

\* 1 Tokai University  
\* 2 Kyushu University  
\* 3 JAXA/ISAS  
\* 4 Nippon Institute of Technology  
\* 5 Shizuoka University

## 1. はじめに

スペース・プラズマ中に観測される現象（ここでは特にプラズマ波動現象を念頭においている）を実験室中で正しくシミュレートするためにはある程度大容積のプラズマが必要であることは言うまでもないが、現象を正しく“スケール・ダウン”するためにはバックグラウンドの磁場強度、プラズマ密度を広範囲に変えられれば大変好都合である。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では大容量（内径73.8 cm、長さ486 cm、容積 $2.1 \text{ m}^3$ ）の真空容器中央部2 mを越す領域で最大2 kGの一樣磁場を印加可能であり、プラズマ密度の調節がいろいろな磁場強度下で容易にできれば大変に優れたスペース・プラズマのシミュレーション装置となる。ヘリコン波利用のヘリコンrf放電はこの目的のために都合が良い。（ヘリコン放電の詳細については例えば篠原による解説論文 [1,2] を参照されたい。）そこで、この装置をヘリコンプラズマ源として使用できるように改造した。我々の知る限り、本装置で生成されるヘリコンプラズマの容積は世界最大であり、ヘリコンプラズマ源としての生成効率も世界最高値を誇るものである。本稿は、このISAS/JAXA 大容量ヘリコンプラズマ装置の概要報告である。

## 2. 実験装置

装置のセットアップの概略図を図1に示す。真空容器はステンレス製で、外径75 cm、内径73.8 cm、長さ486 cmの円筒形である。両端に一基ずつ設置されたターボ分子ポンプ、クライオ・ポンプで排気され、通常 $2-3 \times 10^{-7}$  Torrに保たれている。この種の装置としては極めてクリーンであると言える。実験のためガスを流す際にはクライオ・ポンプのゲートバルブを閉め、ターボ分子ポンプのみを排気に使用する。ヘリコンプラズマ生成のため現在までにテストしたガス種は、アルゴン（Ar: 0.05–2 mTorr）、ヘリウム（He: 0.2–1 mTorr）、水素（ $\text{H}_2$ : 0.3 mTorr）である。本稿で示すデータは全てArプラズマについてである。

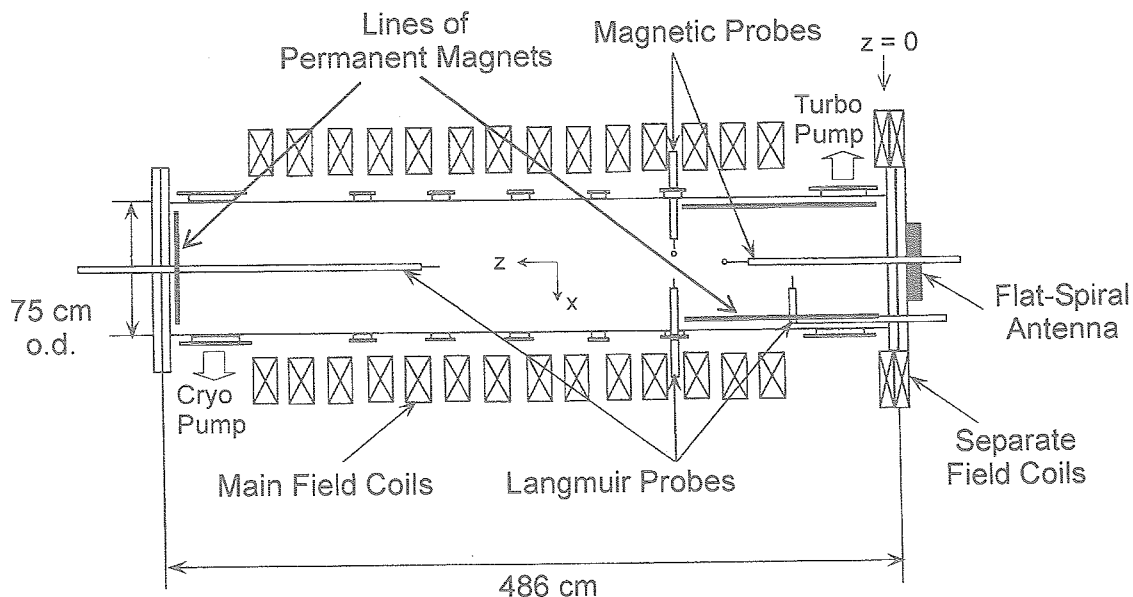


図1 実験装置。

rf放電励起アンテナは、真空容器のエンドフランジ上のクウォーツ・ガラス窓（直径52 cm、厚さ3 cmのガラスを使用。実際の開口部の直径は45 cm）の外側（大気中）約5 mmのところ窓に平行に設置されたフラット・スパイラル・アンテナ（直径43 cm、4ターン）である（図2参照）。このアンテナを使用する利点は：

- (1) アンテナを絶縁体の窓の外側、即ち大気中に設置可能である。
- (2) 従って、取り扱いが極めて容易である。
- (3) さらに、インピーダンス整合器をアンテナに直結させることができるので、アンテナ・インダクタンスによる悪影響を減らすことができる。

- (4) 容量結合性が良いので、非常に低い rf パワーで放電をスタートできる。  
 (5) スパイラル・アンテナ上で rf を印加する位置を変えることによりアンテナからの電磁放射パターンを容易に変更でき、結果として径方向プラズマ密度分布を制御することが可能である (次節を参照のこと)。

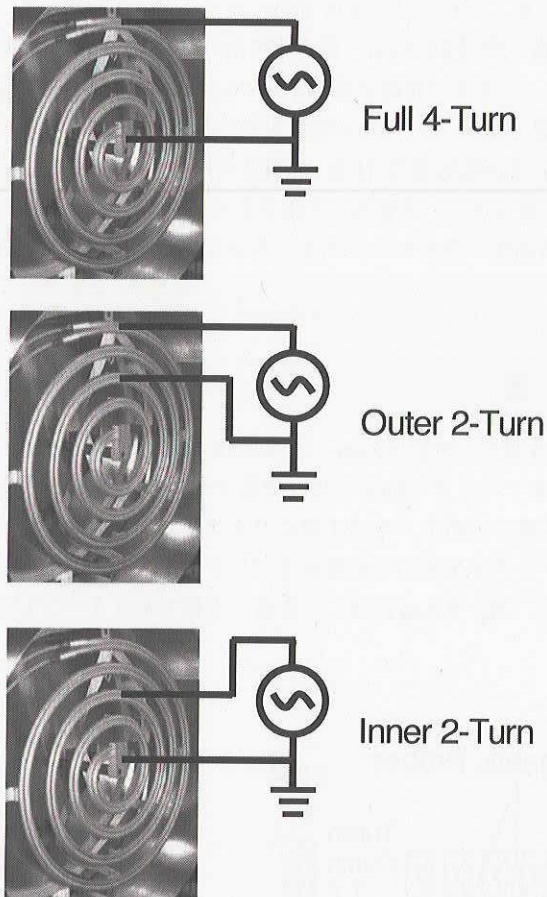
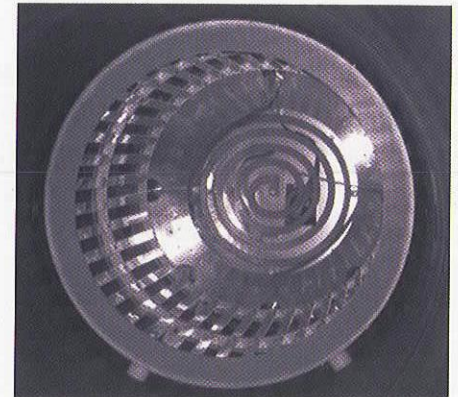
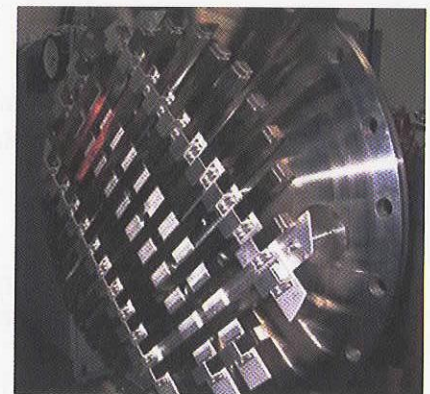


図2 フラット・スパイラル・アンテナと3種類の異なる rf アンテナとの結線法。



(a)



(b)

図3 表面多極カスプ磁場配位を形成する永久磁石群の設置状況。

5番目の項目については図2に示すような3通りについて検討した。さらに、rfアンテナの高電圧 (HV) 側と接地側を入れ替えてアンテナに結線することによっても密度プロファイルを変化させることができることを見出した。(図2に示されているケースは全て“Outer HV”である。HV側がアンテナ中心よりである場合を“Inner HV”と呼んでいる。) このアンテナでは周方向モード  $m=0$  のヘリコン波が励起可能である。

本実験で使用した rf 周波数は 7 MHz である。これは低域混成周波数域であり、ヘリコン波の分散関係の検討から決められたものである。放電は通常、繰り返し周波数 1 Hz、放電の長さ 40 ms のパルス放電である。これは放電が高密度モード (ヘリコンプラズマ) に入った際にプローブ等への熱負荷を軽減するという意味もあるが、多くの波動実験において“静かな”アフターグロー・プラズマを使いたいという要請からも来ている。

真空容器中央部の周囲に設置された 14 個のメイン磁場コイルにより中央部 2 m を超える領域に最大 2 kG の一様磁場を印加可能である。ところが、真空容器端に排気ポートがあるため容器端に磁場コイルが設置されていない。このため、放電用スパイラル・アンテナ近傍の磁場は著しく非一様であり強度が弱い。この状況はヘリコン放電にとってあまり都合が良くないので、非一様性を補正するための補助コイル (Separate Field Coils) をエンドフランジ上に設置した。このコイルの発生する磁場はメイン磁場に比べて大変小さいが、効果としては大きなものがある。即ち、補助コイルの磁場強度をほんの僅か調節することで、放電のスタートアップを容易にすることができたり、第3節で述べるように径方向プラズマ密度分布を制御することが可能である。本稿で示すデータはメイン磁場強度  $B_m = 140$  G (メインコイル電流  $I_m = 50$  A に相当) の場合である。補助コイル電流  $I_s$  ( $< 20$  A) を変化させた時励起アンテナ位置における磁場強度  $B_{ant}$  は、 $B_{ant} = 11$  G (42 G) at  $I_s = 0$  A (16 A) である。因みに、 $I_s$  を変化させても  $B_m$  は殆ど変化しない。

本装置では、更なる性能向上のために、プラズマ表面に多極カスプ磁場配位を作る永久磁石群を励起アンテナよりの真空容器内、及びアンテナと対向する側のエンドフランジ内壁に取り付けた。設置位置については図1を参照されたい。また、設置状況の写真を図3に示す。プラズマ閉じ込め性能の向上により、放電のスタートアップが（永久磁石群設置前に比べて）格段に容易となった。また、プラズマの軸方向一様性が向上した。

本装置の詳細については文献 [3-6] を参照されたい。

### 3. 実験結果 及び 考察

電子密度  $n_e$  が入力 rf パワー  $P_{inp}$  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4(a)である。この時のアンテナ負荷抵抗  $R_t (= R_v \text{ (真空負荷抵抗, } 0.85\Omega) + R_p \text{ (プラズマ負荷抵抗)})$  の変化をプロットした結果が図4(b)である。良好な容量結合性により  $P_{inp} \approx 0.4 \text{ W}$  という低パワーで  $n_e \sim 10^9 \text{ cm}^{-3}$  級のプラズマが生成されている。  $n_e < 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  のプラズマは容量結合プラズマ (capacitively coupled plasma (CCP)) と考えられる。  $P_{inp}$  を上げて行くと、誘導結合プラズマ (inductively coupled plasma (ICP)) に移行し、  $P_{th} \approx 500 \text{ W}$  で密度ジャンプが生じ、  $P_{inp} > P_{th}$  でヘリコンプラズマ (HP) ( $n_e \sim 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ) となっている。ヘリコンモードに移行すると同時に  $R_t$  もジャンプアップし、放電効率が突然に著しく向上したことを示している。密度ジャンプ後のプラズマ中には  $m = 0$  のヘリコン波と解釈できる波動が観測される。励起アンテナ近傍の磁場の一様性が良い程密度ジャンプの様子はよりクリアであり、  $P_{th}$  値が上がる傾向にある。永久磁石群の設置も同様の傾向を呈した。

$N_e$  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  $N_e/P_{inp}$  で表現すると、本装置で生成された Ar プラズマの場合、  $\sim 10^{15} \text{ W}^{-1}$  となる。この値は、今までに報告されているどのヘリコン装置の結果よりも少なくとも1桁以上大きなものである。

次に、本装置で実証された2通りの径方向密度分布制御法について簡単に説明する。第1の方法は、励起アンテナ近傍の磁場の非一様性を調節するというもので、補助コイル電流  $I_s$  を変えることで簡単に実現できる。明らかに、アンテナ近傍の磁場の一様性が良い程メインチャンバー内のプラズマ径が大きくなるものと考えられるが、図5(a)に示すように、その通りのことが実現している。

第2番目の方法は、励起アンテナからの電磁放射パターンを変化させるというもので、これはスパイラル・アンテナ上のどこにアンプからの rf 信号を繋ぐかで容易に実現可能である。具体的には、アンテナ上に幾つかの結線用タップが設けられており、適当な2箇所を選択してアンプ出力に繋げばよい(図2を参照のこと)。アンプの高電圧側がアンテナ外側よりである場合(図2の場合)について“Outer 2-Turn”と“Inner 2-Turn”の結果を比較したのが図5(b)である。半値幅という観点からは両者に殆ど差はないが、“Outer 2-Turn”の場合、中心部のフラットな領域が広がっている。ここで注意を促したいのは、現状のアンテナ構成では、永久磁石群設置後、よりフラットな径方向密度分布の場合、中心部に窪みができる傾向にあるという点である。現在進行中の“低域混成波キャビトン” [7] の実験に際してこれは却って好都合な状況である。

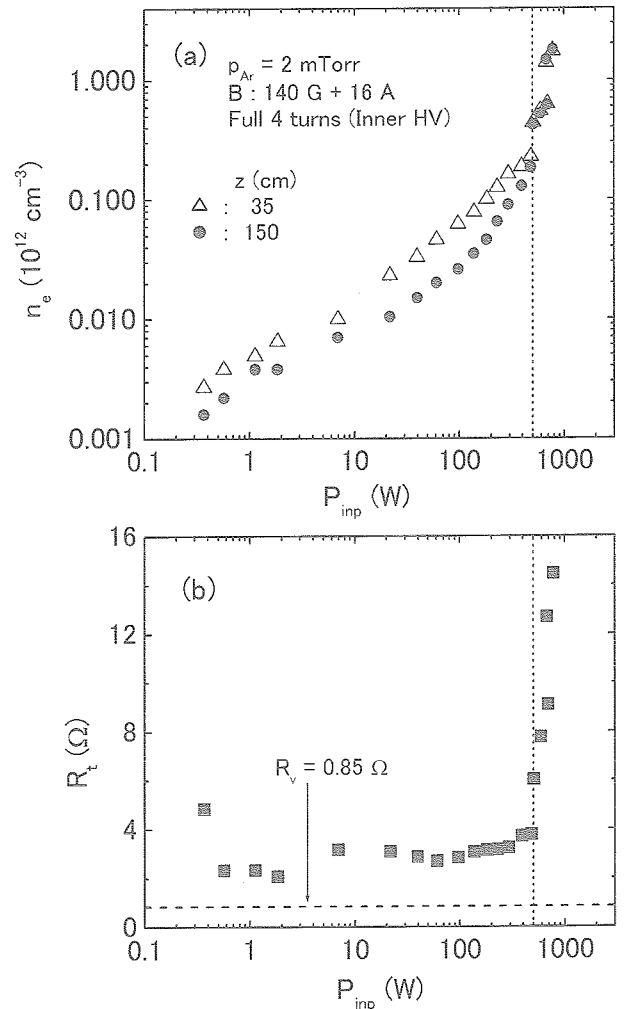


図4 アルゴン放電特性の測定例。



#### 4. ま と め

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（内径 73.8 cm, 長さ 486 cm, 容積  $2.1 \text{ m}^3$ ）ヘリコンプラズマ装置に改造した。励起アンテナとしては、外径 43 cm, 4 ターンのフラット・スパイラル型を採用した。ヘリコンモードに入った Ar プラズマの場合、生成効率  $N_e/P_{\text{inp}} \sim 10^{15} \text{ W}^{-1}$ （即ち、1 W の入力 rf パワーで  $\sim 10^{15}$  のイオン・電子ペアを保持している）という高効率を達成した。これは、1 kW にも満たない rf パワーで  $n_e \geq 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  の高密度プラズマを生成できることに相当する。現在までの実験では、rf アンプの最大出力が 1 kW でしかなかったが、2006 年 1 月に最大出力 5 kW（パルスモード）の rf アンプが新たに設置され、さらに高密度のプラズマが生成可能となり、装置の可能性の飛躍的向上が期待できる。

ISAS/JAXA の大容量ヘリコンプラズマ装置では、

- 1) 励起アンテナ近傍の磁場の非一様性の調節により、
  - 2) 励起アンテナからの電磁放射パターンを変化させることにより、
- 容易に径方向プラズマ密度分布を変化させることが可能である。

以上のような装置の特性を活用することで、種々のスペース・プラズマ関連実験が実施可能である。

#### 謝 辞

本実験の実施にあたり、スペース・プラズマ共同研究設備の前責任者であられた中村良治先生からは、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

の小山孝一郎先生、佐々木進先生、九州大学の河合良信先生、静岡大学の山際啓一郎先生からの激励に対してお礼申し上げます。その他 ISAS/JAXA の多くの職員の方々からのご援助に感謝いたす次第です。

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 1 テーマとして実施されたものです。部分的に科学研究費補助金の補助も受けて研究を実施してきました。

#### References

- [1] 篠原俊二郎, “ヘリコン波による高密度プラズマ生成の最近の話題”, プラズマ・核融合学会誌 **78**, 5 (2002).
- [2] S. Shinohara, “Propagating Wave Characteristics for Plasma Production in Plasma Processing Field”, Jpn. J. Appl. Phys. **36**, 4695 (1997).
- [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 12<sup>th</sup> International Congress on Plasma Physics*, <http://hal.ccsd.cnrs.fr/ccsd-00002013/en/>, 2004.
- [5] S. Shinohara and T. Tanikawa, “Characteristics of a Large Volume, Helicon Plasma Source”, Phys. Plasmas,

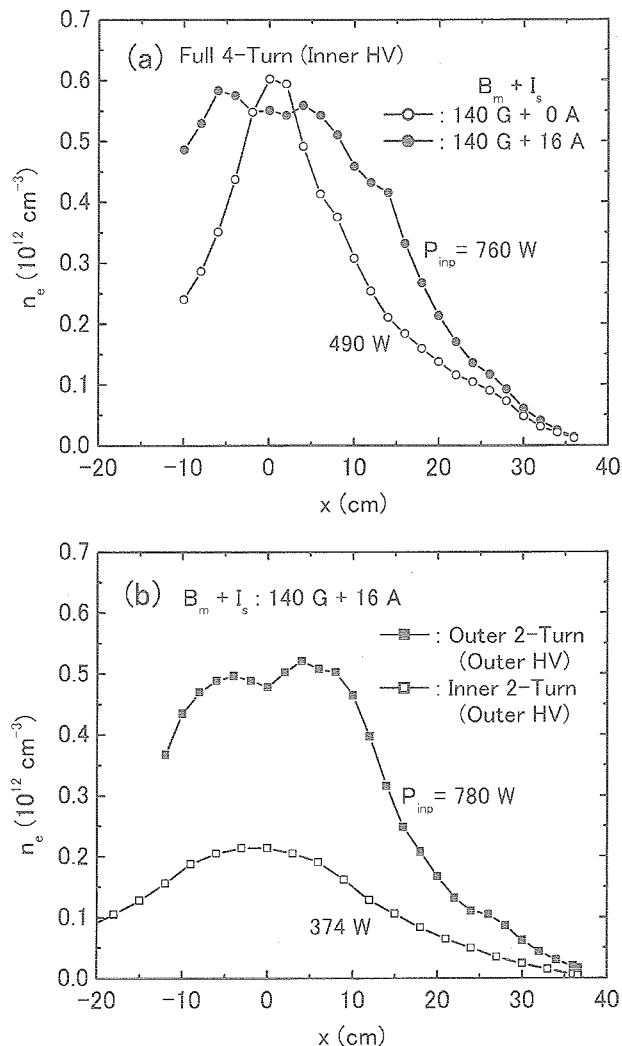


図5 アルゴンプラズマ ( $p_{\text{Ar}} = 0.5 \text{ mTorr}$ ) の  $z = 150 \text{ cm}$  における径方向電子密度分布。(a) アンテナ近傍の磁場非一様性を変えた場合の比較。(b) アンテナ電磁放射パターンを変えた場合の比較。

12, 044502 (2005).

[6] T. Tanikawa and S. Shinohara, "Plasma Performance in Very Large Helicon Device", *Thin Solid Films*, 2006, in press.

[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).