

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 27 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2009～2013

課題番号：21226019

研究課題名(和文)ヘリコン源を用いた先進的無電極プラズマロケットエンジンの研究開発

研究課題名(英文)Research and Development of a Novel Electrodeless Plasma Rocket Engine Using a Helicon Source

研究代表者

篠原 俊二郎 (Shinohara, Shunjiro)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10134446

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 162,600,000円、(間接経費) 48,780,000円

研究成果の概要(和文)：電気推進法は化学推進法より燃費が良い(高比推力)が、プラズマ生成・加速で電極がプラズマと接触する損耗で短寿命となる点があり、本研究ではこれを克服するため完全無電極で行った。

ヘリコン源開発と特性を評価した：74(0.3)cmの世界最大径(最小径)達成や生成効率則を確立し、ヘリコン波とTG波の役割を評価した。多数の加速スキームを提案した：ヘリコン源単独で最大比推力3,000秒、最大推力電力比16 mN/kWとなり、RMF法で励起磁場浸透やイオン速度上昇があった。REFやPA/ICRなどの手法も進めた。レーザー誘起蛍光法や高分解分光等の2次元計測、種々のスラストスタンド開発も行った。

研究成果の概要(英文)：Fuel cost using electric propulsion is better (specific impulse is higher) than chemical one. The contact erosion between a plasma and electrodes, producing and accelerating the plasma, leads to a lifetime shortage. To overcome this, our study had "electrodeless" conditions.

Helicon sources have been developed and characterized: The largest (smallest) diameter of 74 (0.3) cm was achieved, and the scalings of the production efficiency have been established. Roles of a helicon and a TG wave were examined. We have proposed many acceleration schemes: A helicon source alone showed the maximum specific impulse of 3,000 s and the maximum ratio of thrust to power of 16 mN/kW. The excited magnetic field penetration and the ion velocity increase were found in the RMF scheme. Methods such as REF and PA/ICR were also advanced. We have developed the two-dimensional measurement systems using laser induced fluorescence and high-resolution spectroscopy, and the various types of the thrust stands.

研究分野：航空宇宙工学、プラズマ科学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：航空宇宙工学 プラズマ・核融合 ロケット ヘリコンプラズマ 無電極 加速 モデル化 熱流体工学

1. 研究開始当初の背景

電気推進ロケットエンジンは、通常の化学推進ロケットエンジンに比べると「はやぶさ」に見られるように、推力 F は小さいが比推力 I_{sp} が高い (格段に良い燃費) ため、その開発・展開には大きな期待がある。

しかしながらプラズマ生成と加速で電極がプラズマと直接接触する 경우가多く、電極損耗 (不純物混入も問題) のため寿命が短くなる難点となり、それを克服する必要が課題としてあった。

2. 研究の目的

本研究では上記短寿命の問題等を克服するために、電気推進ロケット開発で、プラズマ生成と加速において完全無電極推進を新たに試みる事にある。

つまりこれまでの本研究グループの幅広い先端成果と知見を集大成して、生成・加速電極を直接プラズマに接しない、高効率で損耗の無い先進的無電極プラズマ推進法を新規に開発して進める事にある (図1)。



図1 将来の完全無電極による先進的高密度ヘリコンプラズマ推進のイメージ図

3. 研究の方法

生成に関しては本研究グループが大きな貢献・実績のある高密度ヘリコンプラズマ源を更に用途に応じて開発し、加速方法に関してはヘリコン単独か新規の先端提案研究による試みで行い、工学的体系化を目指すものである: HEAT (Helicon Electrodeless Advanced Thruster) プロジェクトと名付けて行った。

具体的にはプラズマ生成に関しては、種々のサイズのヘリコンプラズマ源開発と特性評価、加速に関しては種々の新規提案方法の加速機構解明と性能評価を行う。サイズスケール則や異なる推進剤の効果も考慮し、体系的理解を進める。また生成・加速に緊要な先進プラズマ診断・計測も開拓する。

ここでテーマ類を各研究者 (異分野出身で実験・理論・シミュレーションが行える先端研究者集団を統合) で各自分担または共同で進め、頻りに研究者間で議論を行う。

4. 研究成果

(1) 高密度ヘリコンプラズマ源開発と特性評価

① 理論・シミュレーション

高効率ヘリコン生成の生成機構解明は 30

年以上の課題であり、ヘリコン波からモード変換した TG 波の減衰が有力候補として考えられてきた。しかし衝突効果を含む流体計算で、ヘリコン波の直接減衰が TG 波による減衰と共に重要であることを初めて見出した。

全粒子計算コードで新たに空間擬 2 次元のコードを開発し低メモリスぺース・高速化が可能となり、流体計算結果とも一致した。

② 実験

電磁石を用いた多くの高密度ヘリコンプラズマ源開発 (図2が本研究期間を含めた今まで開発した装置群の例) を行った。世界最大サイズ (直径 74 cm、プラズマ推進のソースとして重要な軸長と直径の比のアスペクト比も 0.075 と世界最小を達成) を宇宙研の装置を改造して開発した。また世界最小口径も、開発した SHD (Small Helicon Device) を用いて更新した (直径 2 cm から 1、0.5、0.3 cm と減少: 印加周波数 7-70 MHz)。



図2 開発した電磁石を用いた高密度ヘリコンプラズマ装置群

その際、粒子生成効率のスケールリングが、古典拡散に基づいた計算結果と幅広い領域でほぼ合う事を示した (図3: 赤塗りは本研究グループ測定)。また軸長が非常に短い (アスペクト比が小さい) 場合も、実験と予測するスケールリング則と一致した。

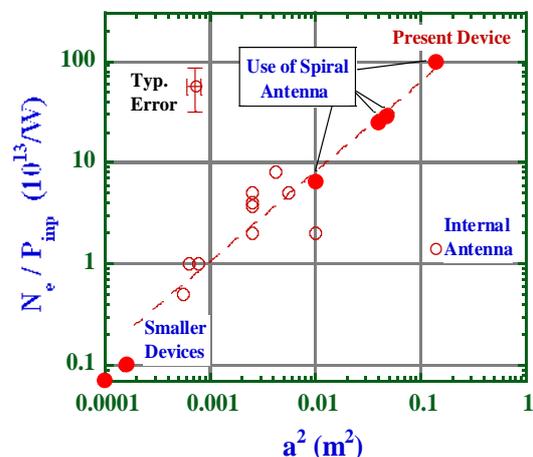


図3 全電子数 N_e を高周波入力パワー P_{inp} で割ったものと半径 a の二乗の関係

周方向モード m を $0, \pm 1, \pm 2$ と選択励起できるヘリコンアンテナの開発にも成功した。またヘリコン励起波動構造や低アスペクト比条件でも特性解析を進めた。

更に永久磁石を用いたコンパクト・スラスト開発を行った(直径 2.6 から 10cm まで)。また本提唱加速法の高効率化のため、0.2 T を越える強磁場の永久磁石型ヘリコンプラズマスラストを開発し、高密度プラズマ生成に成功した。

発散磁場によるプラズマ損失軽減を考慮したテーパ状(直径 10 から 17cm まで)石英管を試作し、開発した永久磁石群と電磁石併用によって、ヘリコンプラズマのパフォーマンスを向上させた。またアルゴンガスに加え、水素、ヘリウム、キセノン放電の特性も求めた(図 4 は大口径装置(LMD: Large Helicon Device)での放電写真)。

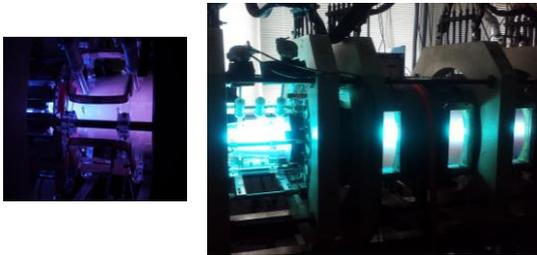


図 4 高密度ヘリコンプラズマ光写真: (左) ソース部のアルゴン光、(右) キセノン光の全体的写真

(2) プラズマの先進加速法開発

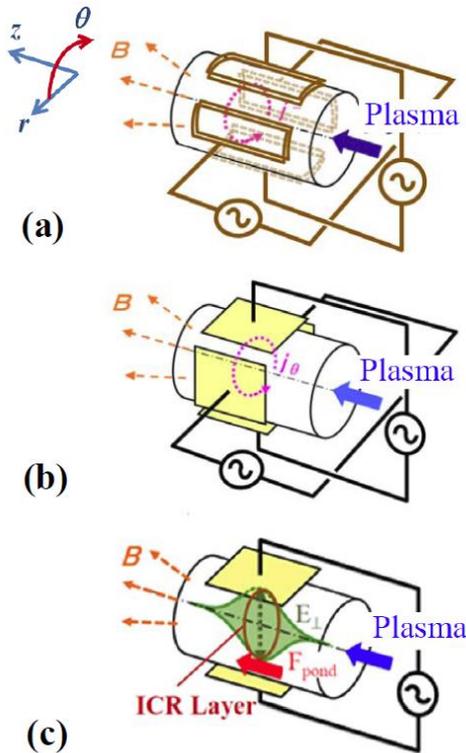


図 5 新規提案の加速法の例: (a) RMF 加速、(b) REF 加速、(c) PA/ICR 加速

新規プラズマ加速法として、以下の多岐に亘る種々の方法を世界で初めて提案した(図 5 にその主な加速法の概念図を示す)。

- i) ヘリコン源単独による高速流生成(+関連して、ポンドロモーティブ力による方法(PA))、
- ii) 回転磁場法(RMF: Rotating Magnetic Field)、
- iii) 回転電場法(REF: Rotating Electric Field)、
- iv) ポンドロモーティブ加速+イオンサイクロトロン共鳴法(PA/ICR: Ponderomotive Acceleration / Ion Cyclotron Resonance)、
- v) $m=0$ コイル励起加速法。

① 理論・シミュレーション

提唱している様々な上記の方法の理論的検討を行いまとめた。また各方法の推力の予想される概略値を求め、かつモデル間の比較を行い、実験の指針とした。

i) ヘリコンプラズマ単独加速では、密度勾配と磁場勾配、及び軸方向の電位構造が重要である指摘を行った。発散磁場で $m=0$ モード励起の単独の PA では、ヘリコン波と準 TG 波の結合による電子への強い軸方向加速と径方向圧縮が重要であることがわかった。

ii) RMF 加速では磁場浸透、粒子通過時間と印加周波数、電磁力の粒子間への印加構造が重要である指摘を行った。磁場浸透時間と励起波動の空間構造については、シミュレーションコード VORPAL で解析を行った。

iii) REF 加速では 3 流体プラズマシミュレーションコードを開発し、2 次元シミュレーションが可能となった。また PIC シミュレーション及び理論解析結果とも定性的に一致した。2 次元電界浸透モデルでは、求めていた 1 次元モデルより実験条件が厳しいことが判明した。これには今後大型化・高電力化・印加高周波数化が重要である。また推力のサイズスケール則も導出した。

iv) PA/ICR では衝突効果も含めた粒子軌道計算により、この概念が有効である事を示し、PA と ICR の加速に占める割合も評価した(図 6)。

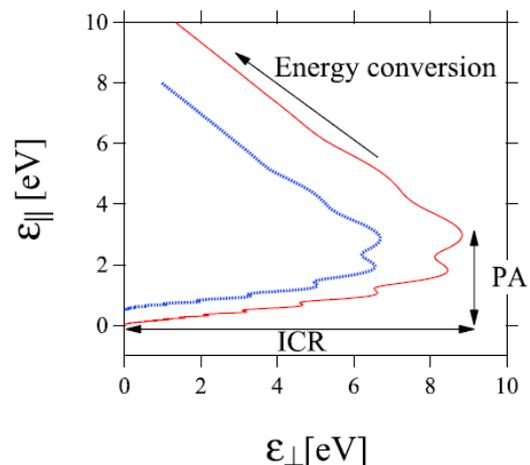


図 6 PA/ICR でのエネルギーゲイン

このスキームでも電磁場の浸透が重要であり、外電極による静電的電場浸透と、プラズマ外電流による磁場励起での誘導電場励起する方法について、モデル計算と比較を行った。

v) $m=0$ 加速では1次元理論及び2次元シミュレーションにより、誘起電磁場分布と粒子軌跡を求め、パラメータサーベイを行った。またイオンサイクロトロン共鳴条件では周方向電流が大きくなり有望なことがわかった。

② 実験

i) ヘリコン源単独では、スラストスタンド測定で、アルゴンプラズマでは口径 10 cm とテーパの 10-17 cm で、最大 I_{sp} がそれぞれ 840 と 2,000 秒を達成できた：推力電力比 F/P は最大 8.5 mN/kW (図 7 は F の P 依存性)。この F/P は、キセノンプラズマでは更に上昇し 16 mN/kW となった (また $P \sim 3$ kW で最大推力 F は 41 mN)。

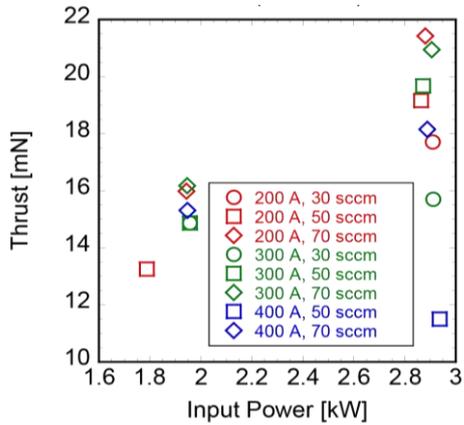


図 7 推力の高周波入力電力依存性

SHD を用いて直径 2 cm の小口径ヘリウム (水素) プラズマで、マッハプローブ測定の結果、比推力 1,100 (3,000) 秒を観測した (本無電極研究の将来目標の一つである 3,000 秒を達成)。

ii) RMF 加速では RMF 励起磁場浸透測定を行い、Milroy (Phys. Plasmas 6 (1990) 1950.) の計算予測より、プラズマへの浸透条件が緩い好都合の結果が得られた (図 8 が例でプラズマの有無にほぼよらず励起磁場が浸透)。

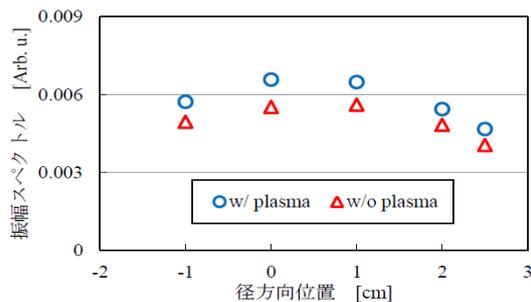


図 8 プラズマの有無による RMF 磁場の空間分布

次に RMF 加速実験ではイオン流速 (マッハプローブ計測) の増加 (最大 15%) があり、流速の加速アンテナ電流位相依存性も見られ、このスキームが実証されたと言える。今後パラメータサーベイを行う必要がある。

iii) REF 加速ではプラズマサイズ、電源周波数、REF 電源数などを変えて実験を行った。イオン流の加速 (マッハプローブ計測) が見られたが増加分は少なく、上述の理論から予想される実験領域に設定する必要がある。

また実験的には全推力を電磁加速分とプラズマ圧力分とに分離することも必要でそれも準備した (プラズマ診断法開発の項参照)。

図 9 は永久磁石を用いたコンパクトヘリコン源で REF 加速実験を行った例である。

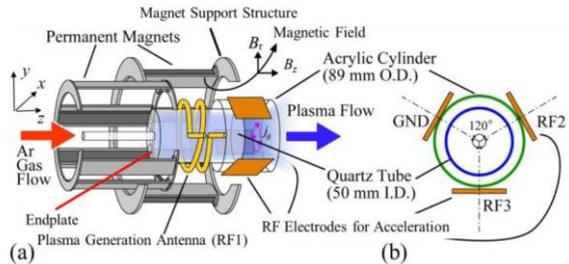


図 9 コンパクトソースを用いた REF 実験

iv) PA/ICR 用に平板アンテナ対を設置し、計算予測に近い実験領域でイオン温度の上昇と軸方向加速が見られた (イオンエネルギーアナライザでの計測)。今後パラメータサーベイと推力測定が必要である。

v) $m=0$ 加速では初期実験を、周波数とコイル巻き数を変えて行い、プラズマへの影響を調べた。

(3) プラズマ診断法開発

① 電気的測定

本研究の装置群に合わせた静電プローブ (シングルとダブルプローブ：挿入のための曲り形状など)、種々の形状のマッハプローブ、磁気プローブ、イオンエネルギーアナライザの試作などを行った。

② 分光測定

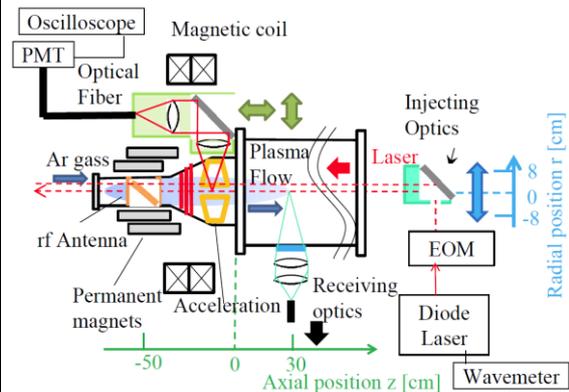


図 10 レーザー誘起蛍光法によるアルゴンのイオンと中性粒子の軸方向速度分布関数の 2 次元測定のプロック図

半導体レーザーを用いたレーザー誘起蛍光法の新規開発を行い、アルゴンイオンと中性粒子の軸方向速度分布関数の2次元空間分布測定を可能とし、プラズマ流の特性評価と性能向上に重要な測定基盤が確立された(図10が測定システム)。

高性能分光器(波長分解能 0.005 nm)に駆動機構を用いた診断開発で、イオンと中性粒子の温度とドップラー速度の2次元空間分布測定を可能とした。

広帯域波長を高速にデータ取得が出来る分光器によるライン強度比測定で、電子温度と密度を評価する研究(非接触で得られ有望)に着手し、定性的な一致をみた(衝突輻射モデルによる計算とライン選定が重要)。アルゴンの分光で確立できれば大きな進歩となる。

1.3 MPS の高速度カメラに Ar I と Ar II フィルターを用いて、高密度ヘリコンプラズマの電子密度と中性粒子密度の空間分布(非対称アーベル変換と ART 法)を求めた。電子密度は静電プローブ結果と良く一致し、この有効性が確認された。これによりプラズマ源から離れるにつれ、電子密度(中性粒子密度)の減少(増加)が観測された(図11)。鏡やファイバースコープ(観測が困難な場所)を用いた測定も可能となった。更に本カメラを用いてブルーム挙動やプラズマ柱の回転現象(電子反磁性方向で約 0.38 kHz)も調べた。

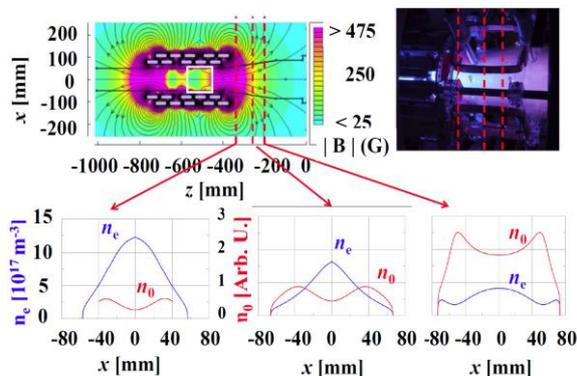


図11 相対的中性粒子密度と電子密度分布

③ スラストスタンド(力学的測定)

プラズマ加速において推力測定は重要である(実験の項参照)。ねじり振り子型とターゲット型のスラストスタンドを開発した。前者は3種類作成し、一部は電磁推力、圧力推力、全推力を分離できる構成とした。後者ではターゲット材質(SUS とポリカーボネイト)と形状(コーンとフラット)を変えて行い、精度の評価も行った。これらは既述の推力測定に用いた。図12と13に前者と後者のそれぞれの例を示す。

なお、これらの諸診断法により種々のプラズマパラメータが取得でき(イオン速度などは複数の方法で評価)、信頼性が向上した。

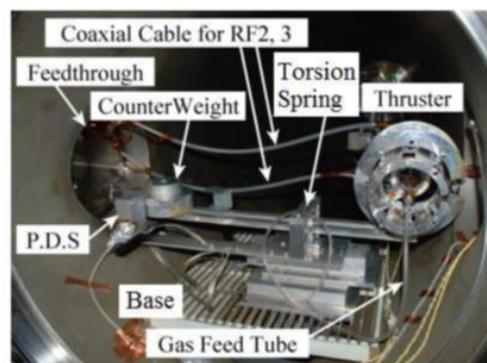


図12 ねじり振り子型スラストスタンド

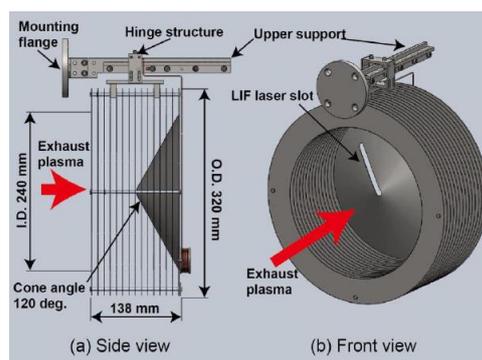


図13 ターゲット型スラストスタンド

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計35件)

- ① S. Shinohara, H. Nishida, T. Tanikawa, T. Hada, I. Funaki, K. P. Shamrai, Development of Electrodeless Plasma Thrusters with High-Density Helicon Plasma Sources, 査読有, IEEE Trans. Plasma Sci., 2014, 印刷中。
- ② D. Kuwahara, Y. Koyama, S. Otsuka, T. Ishii, H. Ishii, H. Fujitsuka, S. Waseda, S. Shinohara, Development of Direct Thrust Measurement System for the Completely Electrodeless Helicon Plasma Thruster, 査読有, Plasma Fus. Res., Vol. 9, 2014, pp. 3406025 1-4. DOI: 10.1585/pfr.9.3406025
- ③ D. Kuwahara, A. Mishio, T. Nakagawa, S. Shinohara, Development of Very Small-Diameter, Inductively Coupled Plasma Device, 査読有, Rev. Sci. Instrum., Vol. 84, No. 10, 2013, pp. 103502 1-4. doi: 10.1063/1.4823524
- ④ F. Otsuka, T. Hada, S. Shinohara, T. Tanikawa, T. Matsuoka, Numerical Modeling of Electrodeless Electric Thrusters by Ion Cyclotron Resonance / Ponderomotive Acceleration, 査読有, Plasma Fus. Res., Vol. 8, 2013, pp. 2406067 1-7. DOI: 10.1585/pfr.8.2406067
- ⑤ T. Motomura, S. Shinohara, T. Tanikawa, K. P.

Shamrai, Characteristics of Low-Aspect Ratio, Large-Diameter, High-Density Helicon Plasmas with Variable Axial Boundary Conditions, 査読有, Phys. Plasmas, Vol. 19, No. 10, 2012, pp. 043504 1-12.

<http://dx.doi.org/10.1063/1.3701558>

- ⑥ T. Matsuoka, T. R. Rudenko, I. Funaki, K. P. Shamrai, T. Nakamura, H. Nishida, T. Tanikawa, T. Hada, S. Shinohara, One Dimensional Modelling of Radio Frequency Electric Field Penetration into Magnetized Plasmas, 査読有, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 51, No. 10, 2012, pp. 096201 1-7.
<http://dx.doi.org/10.1143/JJAP.51.096201>

[学会発表] (計 2 1 3 件) (招待講演 2 2 件)

- ① S. Shinohara, T. Tanikawa, T. Hada, I. Funaki, H. Nishida, F. Otsuka, D. Kuwahara, K. P. Shamrai, Characterization of High-Density Helicon Plasma Sources and Application to Electrodeless Plasma Thrusters, 2013 Asia Pacific Radio Science Conf. (AP-RASC2013), Taipei, Taiwan (September 6, 2013) (招待講演)
- ② S. Shinohara, H. Nishida, T. Tanikawa, T. Hada, I. Funaki, K. P. Shamrai, Characterization of Developed High-Density Helicon Plasma Sources and Helicon Electrodeless Advanced Thruster (HEAT) Project, IEEE Pulsed Power & Plasma Science (PPPS 2013), San Francisco, U.S.A. (June 19, 2013) (招待講演)
- ③ S. Shinohara, Research and Development of High-Density Helicon Plasma Sources and Their Application to Electrodeless Advanced Thrusters, The 8th EU-Japan Joint Symposium on Plasma Processing、奈良 (January 17, 2012) (招待講演)
- ④ 篠原俊二郎, 高密度ヘリコンプラズマの物理現象とその応用研究、日本物理学会 2010 年秋季大会, 大阪 (2010 年 9 月 25 日) (招待講演)
- ⑤ S. Shinohara, Characterization of High-Density Helicon Plasma Sources and Their Application to Electrodeless Plasma Thrusters, 10th Asia-Pacific Conf. on Plasma Sci. Technol. (APCPST) & 23rd Symp. on Plasma Science for Materials (SPSM), Jeju, Korea (July 6, 2010) (招待講演)
- ⑥ S. Shinohara, High Density Helicon Plasma Sources: Development and Application, 37th European Physical Society Conf. on Plasma Phys., Dublin, Ireland (June 21, 2010) (招待講演)

[その他]

ホームページ等

<http://www.tuat.ac.jp/~sinohara/>

受賞

篠原俊二郎、谷川隆夫、K. P. Shamrai、高密度ヘリコン波プラズマの物理現象と高崖的応用の研究、平成 22 年度文部科学大臣表彰科学技術賞 (研究部門)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

篠原 俊二郎 (SHINOHARA, Shunjiro)
東京農工大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号：10134446

(2) 研究分担者

谷川 隆夫 (TANIKAWA, Takao)
東海大学・総合科学技術研究所・教授
研究者番号：70207174

羽田 亨 (HADA, Tohru)
九州大学・大学院総合理工学研究院・教授
研究者番号：30218490

船木 一幸 (FUNAKI, Ikkoh)
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授
研究者番号：50311171

西田 浩之 (NISHIDA, Hiroyuki)
東京農工大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：60545945

(3) 連携研究者 (最終年度)

山形 幸彦 (YAMAGATA, Yukihiro)
九州大学・大学院総合理工学研究院・准教授
研究者番号：70239862

井 通暁 (INOMOTO, Michiaki)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授
研究者番号：00324799

高橋 和貴 (TAKAHASHI, Kazunori)
東北大学・工学研究科・准教授
研究者番号：80451491

大西 直文 (ONISHI, Naofumi)
東北大学・工学研究科・准教授
研究者番号：20333859

桑原 大介 (KUWAHARA, Daisuke)
東京農工大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号：60645688