

平成 21 年 5 月 15 日現在

研究種目：基盤研究（A）
 研究期間：2005 年度～2008 年度
 課題番号：17206084
 研究課題名（和文）ヘリコンプラズマ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 Novel Electrode-less Plasma Rocket Engines using Helicon Sources
 研究代表者
 都木 恭一郎（TOKI KYOICHIRO）
 東京農工大学・大学院共生科学技術研究院・教授
 研究者番号：40172142

研究成果の概要：

電気推進ロケットエンジンは、太陽電池等のエネルギーにより推進剤をプラズマ化して電氣的に加速噴射する高効率・低燃費型の宇宙機用エンジンであるが、プラズマを生成加速する電極の寿命が課題であった。本研究では、寿命制限の無い究極の電気推進ロケットエンジンを目指して、プラズマの生成から加速にいたる全てを無電極アンテナで行う新しいタイプのエンジンの研究を実施した。直径 2.5cm の小型エンジンによる地上実験では、高密度プラズマの生成に電磁波の一種であるヘリコン波励起技術を用いた。更に、このヘリコンプラズマをアンテナによって電磁加速するオール無電極電気推進ロケットの実証に世界で初めて成功した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2005 年度	14,400,000	4,320,000	18,720,000
2006 年度	7,500,000	2,250,000	9,750,000
2007 年度	6,800,000	2,040,000	8,840,000
2008 年度	6,000,000	1,800,000	7,800,000
総計	34,700,000	10,410,000	45,110,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：無電極プラズマ生成、ヘリコンプラズマ源、無電極プラズマ加速、電磁加速、プラズマロケットエンジン

1. 研究開始当初の背景

欧米やロシアでは、電気推進ロケットエンジンが実用衛星の軌道・姿勢制御に使われ始めている。電気推進ロケットは、従来から各種宇宙機で用いられている化学推進ロケットに比べて推力は微小（30mN/kW 前後）であるが、圧倒的に燃費が良く（10 倍以上、噴射速度 30km/s 以上）、推進効率も高い（40% 以上）。我が国でも、2003 年に打ち上げられた小惑星探査機「はやぶさ」にイオンロケットエンジンと呼ばれるタイプの電気推進ロケットが搭載された。これは、マイクロ波を使ってキセノン推進剤をプラズマ化する方

式で、従来のグロー放電陰極型よりも長寿命（1 万時間以上）である。しかし、高電圧のグリッド電極をプラズマに浸して加速するため、プラズマの衝突によってグリッド電極が損耗することで、寿命を迎えてしまう。もしも、超長寿命なプラズマロケットエンジンを実現できれば、これまで数年であった衛星や惑星間探査機の寿命を飛躍的に延ばすことができる。こうすることで、今まで考えられなかったような超長期宇宙ミッションが可能となることから、真の意味での“宇宙船”構築に貢献できるであろう。

電気推進ロケットの超長寿命化のために、

プラズマと接触する電極を排除する”無電極”化は、宇宙推進分野における1つのトレンドとして世界中で注目されている。米国 NASA では無電極プラズマ生成 + 単純な磁気ノズル膨張加速を提唱しており、米国の Princeton 大学やドイツの Stuttgart 大学なども類似の研究を開始した。NASA の VASIMR (Variable Specific Impulse Magnetoplasma Rocket) エンジンはいオンサイクロトロン加熱 ICRH (Ion Cyclotron Resonance Heating) + 磁気ノズルによる熱エネルギー 並進運動エネルギー変換によるプラズマ加速を行っている。VASIMR を熱加速型とするなら、豪州や欧州では、ヘリコン波プラズマ源のダブルレイヤー構造に伴う上下流のポテンシャル落差を利用してイオンを加速する静電加速型も検討されている。しかしながら、これらの電気推進ロケットは原理検証段階にあり、当グループが目指すプラズマ生成と加速の完全無電極化の実現には至っていない。

2. 研究の目的

本グループでは、世界に先駆けて無限寿命の電気推進ロケット技術確立することを目指している。オール無電極というコンセプトは、電気推進ロケットの超長寿命化へ向けての明快なソリューションとなるであろう。具体的には、まず、プラズマを電磁波励起プラズマ源の一種である無電極ヘリコンプラズマ源で生成し、非接触アンテナでプラズマ中に誘起されたホール電流と印加磁場とで生じるローレンツ力によって加速を行う。前者はマイクロ波よりも高密度なプラズマ生成 (10^{13}cm^{-3} 以上) を達成できる可能性を持つ。そして後者は、新しい無電極アンテナ方式の電磁加速方式で、繰り返しパルス方式、連続加速方式など、本グループが提案する先進的なアイデアである。本研究では、無電極プラズマの生成機構ならびに加速機構を明確にした上で、小型エンジンデモ機によってプラズマの生成と加速を実験的に実証することを目的とする。

3. 研究の方法

ヘリコン波プラズマ源は、比較的容易に高密度プラズマを生成する技法として発達しつつある。本研究では、無電極プラズマロケットエンジンの概念設計を実施し、その上で図1のように、小ヘリコンと称する直径2.5 cmのヘリコンプラズマ源と、直径73.8 cmの大型ヘリコンプラズマ源を対象に、実験ならびに理論解析を行う。

1) 無電極プラズマロケットエンジンの提案と原理実証

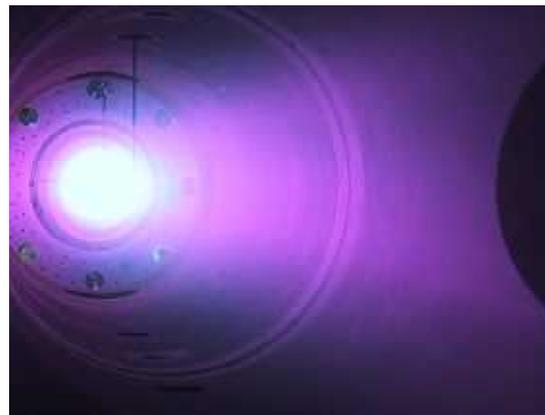
無電極プラズマの生成および加速を行う新しいプラズマロケットエンジンを提案す

る。その上で、新しいプラズマロケットエンジンの Proof-of-Concept を、直径2.5cmの小型ヘリコンプラズマロケットにて実施する。実験装置の概略を図2に示す。直径0.7 m、長さ1.2 mの中型の真空チャンバにガラス管を接続し、ガラス管内部を真空にする。プラズマ生成には電磁コイルおよびサドル型アンテナを用いる。13.56 MHzの整数倍波をシグナルジェネレータにより発振させ、RFアンプで増幅する。その後、整合器を経てサドル型アンテナへ送られる。最大で600 Wの高周波パワーが出力可能である。

高密度プラズマが生成された下流には、後述する加速用アンテナを配置して、0.5~15 MHzの高周波パワーを印加する。プラズマおよびプラズマ加速の状態は、マッシュプローブによる流速測定やダブルプローブによるプラズマ密度・電子温度測定によって判断する。



(a)直径 2.5cm の小ヘリコン源



(b)直径 73.8cm の大型ヘリコン源

図1 ヘリコンプラズマ源.

2) 大型ヘリコンプラズマ源による高密度プラズマ生成実験

将来の大型ヘリコンプラズマロケットを意識した、大容量高密度ヘリコンプラズマ源の研究開発を行った。実験では、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部の大容量 高密度ヘリコンプラズマ装置 (図1(b)) を利用した。真空容器は、外径75 cm、内径73.8 cm、

長さ 486 cm の円筒形であり、プラズマ実効長を可変とするための終端電極を設置した。また、プラズマへの電力供給には、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ォーツ・ガラス窓の外側（図の右端）に設置されたフラット・スパイラル・アンテナを使用した。使用したガスは Ar（ガス圧 = 2.0 mTorr）である。印加磁場強度は可変であるが、典型的な例として、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、本報告書のデータは、周波数 7 MHz/放電繰り返し頻度 1 Hz/放電長 40 ms のパルス放電で得られた。

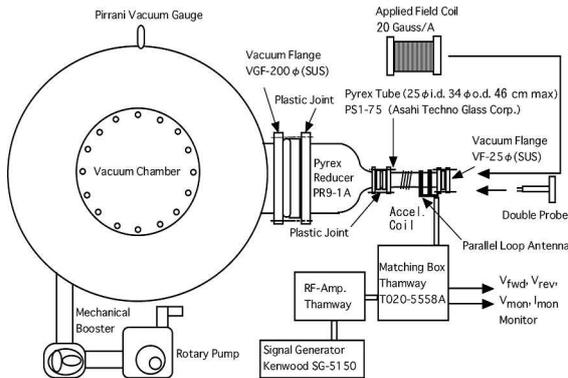


図 2 小ヘリコンプラズマロケット試験装置。

4. 研究成果

1) 無電極プラズマロケットエンジンの提案と原理実証

プラズマ生成部と加速部の検討

ホイッスラー波は右回り円偏波の電磁波で境界がある場合はヘリコン波と言われる。ヘリコン波によるプラズマ生成機構は必ずしも明らかになっていないが、無電極で高密度プラズマを生成できることから、プラズマロケットエンジンの無電極プラズマ生成用に採用することにした。

無電極プラズマ電磁加速方式には、独自の提案による連続型加速（図 3）、パルス繰り返し型加速（図 5）に加え、回転磁場型加速、プラズマ波動利用型加速、ダブルレイヤー型加速、等がある。ここでは連続型加速およびパルス繰り返し型加速について実験的に検討した。無電極電磁加速は電子電流と自己誘起または外部印加磁場との間に生ずる $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ ローレンツ力によって行われる。

プラズマ生成実験結果

図 4 に小ヘリコン装置で計測された高周波（RF）投入電力・プラズマ密度特性を示す。RF 電力を増大させて行くと、CCP (Capacitively Coupled Plasma) で点火、ICP (Inductively Coupled Plasma) への移行、さらには外部磁場の印加によってヘリコンモードにジャンプすると言われている。低パワ

域の最初のジャンプは CCP モードから ICP モードへの遷移に相当し、200W 付近で現れたジャンプは ICP モードからヘリコンモードへのジャンプに相当する。この時、これまでピンク色であったプラズマが突然青色に変化するいわゆるブルーモード遷移が観測された。本実験では、約 300 W の正味 RF パワで 10^{13} cm^{-3} のプラズマ密度を達成している。電子温度は 3~6 eV であった。生成されたプラズマ半径、密度、印加磁場強度などから判断すると、ヘリコン波の分散関係式を満足しており、超小型ヘリコン波励起プラズマ源であることが確認された。

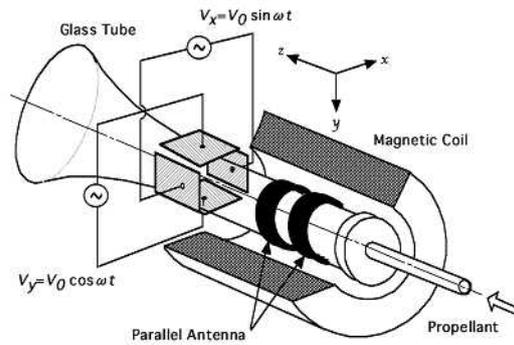


図 3 Lissajous 加速実験。

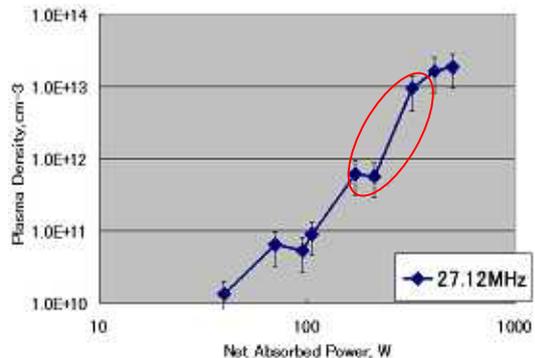


図 4 RF 投入電力に対するプラズマ密度特性（ダブルサドル型アンテナ, Ar 質量流量:0.5mg/s, 磁束密度:800gauss, RF 周波数:27.12MHz, 非加速時）。

プラズマ加速実験結果

次に、プラズマ加速実験について述べる。図 5 の繰り返しパルス型加速実験では、プラズマ生成アンテナの下流に 1 ~ 8 巻きの加速用コイルを巻きそこに 0.5 ~ 1.5MHz のランブ波形（鋸歯状波）を印加した。加速フェーズにあってコイル磁界がプラズマ中に浸透して周方向に反磁性電流を誘起するが、これと元々の印加外部磁場の半径方向成分との間に $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ 力を発生させてプラズマを加速する。減速フェーズでは加速フェーズよりも周波数が速いためプラズマ中へのコイル磁界の浸透時間が不十分で減速効果は薄いと予想される。磁場を 1000 gauss、Ar 流量を

1mg/s、プラズマ生成のための RF 周波数と RF パワを 27.12 MHz と 200 W とし て繰返 しパルス型加速実験を行った。加速周波数を 0.5 または 1.0 MHz、加速のための投入パワを 100 W とした時、流速が 1.5 km/s 程度上昇するなど、繰返しパルス型加速に成功した。

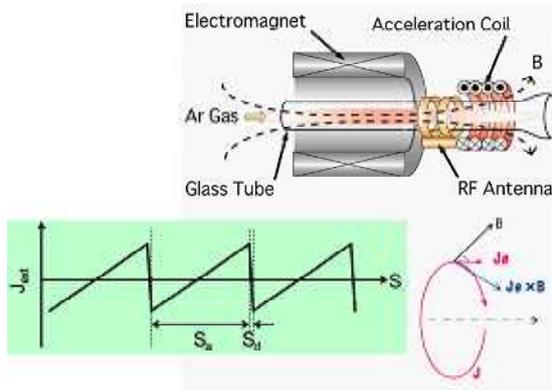


図 5 繰返しパルス型加速実験.

もう一つの加速型式である連続型加速は、図 3 のように、縦方向と横方向にそれぞれ sin 波と cos 波の電界を印加しプラズマ内部に周方向の $E \times B$ ドリフトを起こさせる。この連続加速形式は、Lissajous 加速とも称している。Lissajous 加速では、イオンサイクロトロンより十分に速く、電子サイクロトロンより遅い回転電界を与えることで電子 $E \times B$ ドリフトのみを有効にして周方向電流を作る。従って、繰返しパルス型とは異なり、 $J \times B$ による連続的加速が可能となる。

以下に "Lissajous" 加速型の実験結果を示す。マッハプローブは、加速極板アンテナの端から 6.5 cm 下流に設置した。本実験では、2 組の加速極板アンテナに印加する高周波信号の位相差を可変パラメータとしている。図 6 のプラズマ流速を見ると、どの位相差においても流速が上昇しており、平均で約 30 % プラズマ流速が上昇した。連続型加速についても、プラズマ加速を世界で初めて実現した。

以上のように、独自の無電極加速方式（繰返しパルス型および連続型加速）によるプラズマ加速に世界初で初めて実現した。実験で得られた最大プラズマ噴射速度は Ar 推進剤を連続加速したケースの 7.7 km/s であった。しかし、この性能値は、プラズマロケットエンジンの性能目標値（噴射速度で 50 km/s 程度、推進効率で 60%）の 1/7 程度に留まっている。今後の課題として、中性粒子との衝突によるプラズマ生成・加熱を避けるような動作パラメータの最適化探索が必要であろう。励起されるプラズマ電流から定常的な推進力を取り出すためには、何らかの非線形過程が含まれる必要があることが理論的に分かっており、今後は理論解析と実験研究が連携

した推進性能最適化が必要である。

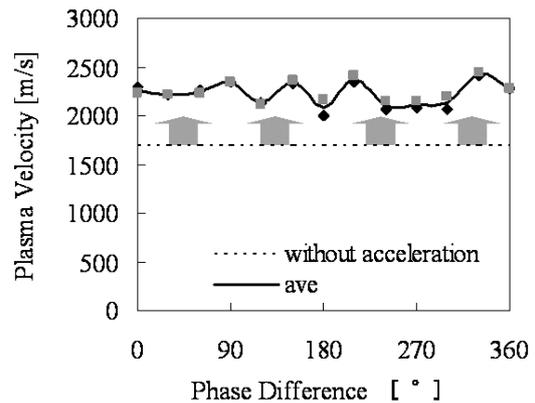


図 6 プラズマ流速 vs. 加速極板アンテナ位相差 (点線は加速前のプラズマ流速, Ar ガス流量:0.5 mg/s, 真空度:0.10 Pa, プラズマ生成周波数 27.12 MHz, 正味プラズマ生成パワ:600 W, 加速周波数:10 MHz, 正味加速パワ:400 W) .

2) 大型ヘリコンプラズマ源による高密度プラズマ生成実験

大型ヘリコンプラズマ源にて電子密度 n_e が入力 RF パワ P_{inj} を上げるに連れどのように上昇するのかをプロットしたのが図 7 である。 $P_{th} \approx 700$ 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。このように高密度モードに移行するとヘリコンプラズマに特有なブルーモード発光が見られると共にプラズマ負荷抵抗が急激に上昇し、RF パワが良好にプラズマに吸収され、放電効率が著しく向上している。

本実験から、アスペクト比（直径と軸長の比）を 0.17 と極端に小さくしても $P_{inj} \approx 4$ kW で $n_e \approx 8 \times 10^{12}$ cm⁻³ という高密度プラズマが生成可能であることが明らかになった。この大口径短軸長プラズマ源は、ヘリコンプラズマロケットのみならず、既存のイオンエンジンの発展型プラズマ源としても期待される。

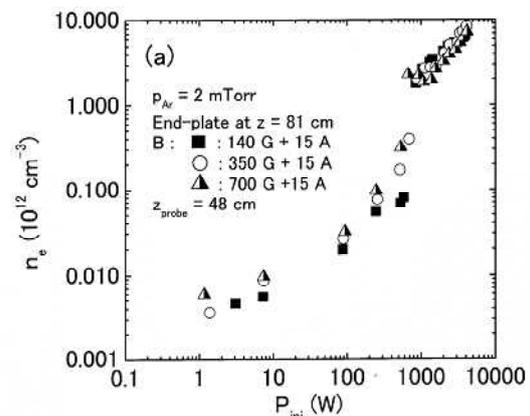


図 7 大型ヘリコンプラズマ源の特性.

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は下線)

[雑誌論文](計 18 件)

- ・ K. Toki, S. Shinohara, T. Tanikawa, T. Hada, I. Funaki, K.P. Shamrai, Y. Tanaka, and A. Yamaguchi: Plasma Acceleration in a Compact Helicon Source Using RF Antennae, Journal of Plasma and Fusion Research Series, to be published, 査読有.
- ・ T. Motomura, K. Tanaka, S. Shinohara, T. Tanikawa, and K.P. Shamrai: Characteristics of Large Diameter, High-Density Helicon Plasma with Short Axial Length Using a Flat Spiral Antenna, Journal of Plasma and Fusion Research Series, to be published, 査読有.
- ・ S. Shinohara, T. Hada, T. Motomura, K. Tanaka, T. Tanikawa, K. Toki, Y. Tanaka, K. P. Shamrai: Development of High-Density Helicon Plasma Sources and Their Applications, Phys. Plasmas, 16(2009)057104 1-10, 査読有.
- ・ K. Terasaka, S. Shinohara, Y. Nagashima, T. Yamada, M. Kawaguchi, T. Maruta, S. Inagaki, Y. Kawai, N. Kasuya, M. Yagi, A. Fujisawa, K. Itoh, S. Itoh: Study on Low-Frequency Fluctuations Using New Azimuthal Probe Array in High-Density Helicon Linear Plasma, Plasma and Fusion Research, 2(2008), pp.031 1-3, 査読有.
- ・ K. Toki, S. Shinohara, T. Tanikawa, T. Hada, I. Funaki, Y. Tanaka, A. Yamaguchi, and K.P. Shamrai: On the Electrodeless MPD Thruster Using a Compact Helicon Plasma Source, AIAA-2008-4729, 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Hartford, (2008), pp.1-9, 査読無.
- ・ Y. Tanaka, K. Toki, S. Shinohara, T. Hada, T. Tanikawa, I. Funaki and K. P. Shamrai: Plasma Electromagnetic Acceleration with Antennae in Small Helicon Source, 26th International Symposium on Space Technology and Science, Hamamatsu, 2008-b-48, Hamamatsu, June (2008), pp.1-6, 査読無.
- ・ K. Toki, S. Shinohara, T. Tanikawa, K. Shamrai, T. Hada, and I. Funaki: Compact Helicon Source Experiments for Electrodeless Electromagnetic Thruster, AIAA-2007-5311, 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Cincinnati, (2007) pp.1-7, 査読無.
- ・ 谷川隆夫, 篠原俊二郎, 船木一幸, 他, 宇宙研における高密度ヘリコンプラズマ実験, 2006 年度宇宙関連プラズマ研究会講演集, JAXA-SP-06-016, (2007), pp.30-34, 査読無.
- ・ 都木恭一郎, 橋本隆, 牧田賢治, 田中良和, 篠原俊二郎, 羽田亨, 池田泰, 谷川隆夫, 他: 小ヘリコン源を用いたプラズマ生成・加速, 2006 年度宇宙関連プラズマ研究会講演集, JAXA-SP-06-016, (2007), pp.62-66, 査読無.
- ・ S. Shinohara and H. Mizokoshi: Development of a Strong Field Helicon Plasma Source, Rev. Sci. Instrum. 77(2006)036108, pp.1-4, 査読有.
- ・ K. P. Shamrai and S. Shinohara: Modeling Electromagnetic Field Excitation and rf Power Absorption in a Large Helicon Plasma, Thin Solid Films, 506-507(2006), pp.555-558, 査読有.
- ・ K. Toki, S. Shinohara, T. Tanikawa and K. P. Shamrai: Small Helicon Plasma Source for Electric Propulsion, Thin Solid Films, 506-507(2006) 597-600, 査読有.
- ・ T. Tanikawa and S. Shinohara: Plasma Performance in Very Large Helicon Device, Thin Solid Films, 506-507(2006)559-563, 査読有.
- ・ K. Toki, S. Shinohara, T. Tanikawa, K. P. Shamrai, I. Funaki, T. Hashimoto, and K. Makita, Small Helicon Source for Electrodeless Plasma Production and Electromagnetic Acceleration 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Sacramento, AIAA-2006-4843 (2006), pp.1-8, 査読無.
- ・ K. Toki, S. Shinohara, T. Tanikawa, T. Hada, I. Funaki, K.P. Shamrai, T. Hashimoto, K. Makita, and Y. Ikeda: Study of Electrodeless Plasma Production and Electromagnetic Acceleration, Proceedings of the 25th International Symposium on Space Technology and Science, 2006-b-45, June (2006), pp.298-303, 査読有.
- ・ 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, 2005 年度宇宙関連プラズマ研究会講演集, JAXA-SP-05-020, (2006), pp.58-63, 査読無.
- ・ S. Shinohara and T. Tanikawa: Characteristics of a Large Volume, Helicon Plasma Source, Phys. Plasmas, 12 (2005)044502 1-4, 査読有.
- ・ T. Tanikawa, S. Shinohara, and K. Toki: Helicon Plasma Source Using a Flat-Spiral Antenna for Electric Propulsion, Proceedings of the 56th International Astronautical Congress (Fukuoka, 2005), IAC-05-C4.4.05 (8 pages), 査読無.

[学会発表](計 17 件)

- 本村大成,田中謙次,村上勝彦,篠原俊二,谷川隆夫,K.P. Shamrai: スパイラルアンテナを用いた短軸長の大口徑・高密度ヘリコンプラズマ特性 III,日本物理学会第 64 回年次大会,池袋,2009 年 3 月 30 日.
- 羽田亨,篠原俊二: 次世代電気推進のための外部電磁場プラズマ加速の理論モデル,宇宙関連プラズマ研究会 2008,相模原,2008 年 12 月 16 日.
- 都木恭一郎,篠原俊二,谷川隆夫,羽田亨,船木一幸,田中良和,横井賢二,K.P. Shamrai: RF アンテナによる無電極 MPD スラスタの検討,宇宙関連プラズマ研究会 2008,相模原,2008 年 12 月 16 日.
- 本村大成,田中謙次,村上勝彦,篠原俊二,谷川隆夫,K.P. Shamrai: 大口徑・短軸長プラズマの励起波動特性,第 25 回プラズマ・核融合学会年会,栃木,2008 年 12 月 4 日.
- S. Shinohara: Development of High-Density Helicon Plasma Source and Its Applications, The 50th Annual Meeting of the Division of Plasma Physics of American Physical Society, Dallas, Nov.20(2008),(招待講演).
- S. Shinohara, et al.: Characteristics of High-Density Helicon Plasma with Large Diameter Excited by a Flat Spiral Antenna, The 50th Annual Meeting of the Division of Plasma Physics of American Physical Society, Dallas, Nov.19(2008).
- 田中良和,都木恭一郎: RF アンテナを用いたプラズマ電磁加速方法の実験,第 52 回宇宙科学技術連合講演会,淡路島夢舞台国際会議場,II19,2008 年 11 月 5 日.
- 都木恭一郎: ヘリコンプラズマ源を用いた無電極 MPD スラスタの検討,大電力化/モジュール化電気推進に関する研究会,東京国際フォーラム,2008 年 10 月 21 日.
- 田中良和,都木恭一郎,篠原俊二,羽田亨,谷川隆夫,船木一幸,K.P.シャムライ: 小型ヘリコン源と無電極プラズマ電磁加速,2007 年度宇宙輸送シンポジウム,相模原,2008 年 1 月 29 日.
- 田中良和,都木恭一郎: 小型ヘリコン源とアンテナを用いたプラズマ電磁加速,第 51 回宇宙科学技術連合講演会,2G07,札幌,2007 年 10 月 30 日.
- 谷川隆夫,山際啓一郎,船木一幸,佐藤杉弥,篠原俊二: 宇宙研磁化プラズマ装置で生成した比較的プラズマ長の短い大口徑ヘリコンプラズマの特性,平成 18 年度スペース・プラズマ研究会,相模原,2007 年 3 月 22-23 日.
- 橋本隆,都木恭一郎,篠原俊二,谷川隆

夫,船木一幸,K.P. Shamrai: ヘリコン波による高密度プラズマの生成,平成 18 年度宇宙輸送シンポジウム,相模原,2007 年 1 月 18-19 日.

- 都木恭一郎,篠原俊二,谷川隆夫,K.P. Shamrai,船木一幸,羽田亨,池田泰,橋本隆,牧田賢治: 小ヘリコン源を用いたプラズマ生成・加速,宇宙関連プラズマ研究会 2006,相模原,2006 年 12 月 19 日.
- 橋本隆,牧田賢治,都木恭一郎,篠原俊二,羽田亨,池田泰,谷川隆夫,船木一幸: ヘリコン源による高密度プラズマの構築,第 50 回宇宙科学技術連合講演会,3F18,北九州,2006 年 11 月.
- K. Toki, T. Hashimoto, K. Makita, S. Shinohara, T. Hada, Y. Ikeda, T. Tanikawa, I. Funaki, K.P. Shamrai: Plasma Production and Electromagnetic Acceleration Using a Compact Helicon Source, Asian Joint Conference on Propulsion and Power, J004, Beijing, April 21(2006).
- 池田泰,羽田亨,松清修一,篠原俊二,都木恭一郎,橋本隆,牧田賢治,時間変動外部電磁場に対するプラズマ応答の計算機実験,平成 17 年度宇宙輸送シンポジウム,相模原,2006 年 1 月 17-19 日.
- Y. Ikeda, T. Hada, S. Matsukiyo, S. Shinohara, and K. Toki, Response of a Cylindrical Plasma to Time-varying External Electromagnetic Field: Numerical Simulation Study, 29th Int. Electric Propulsion Conference, IEPC-2005-117, Princeton, Oct.31-Nov.4 (2005).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

都木 恭一郎 (TOKI KYOICHIRO)

東京農工大学・大学院共生科学技術研究院・教授

研究者番号: 40172142

(2) 研究分担者

篠原 俊二 (SHINOHARA SHUNJIRO)

九州大学大学院・総合理工学研究院・准教授
研究者番号: 10134446

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 TORU)

九州大学大学院・総合理工学研究院・准教授
研究者番号: 30218490

船木 一幸 (FUNAKI IKKOH)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部・准教授

研究者番号: 50311171

(3) 連携研究者 なし