

氏名	高橋和貴
所属機関	東北大学 大学院工学研究科
研究題目	無電極電気推進開発に向けたヘリコンプラズマの磁気ノズル離脱現象

1. 研究の目的

多様化する宇宙ミッションにおいて、衛星・宇宙探査機の推進エンジンとして電気推進機の有効性が認識され、国際的な開発競争が進んでいる。従来の電気推進方式ではプラズマの生成・加速に電極を使用しているため、電極がプラズマに暴露しており、イオンダメージ・熱負荷による電極損傷が避けられず、長寿命化が困難である。本研究では、ヘリコンプラズマ発生源に磁気ノズルを重畳した無電極ヘリコンプラズマ推進機を研究対象としている。

プラズマ流がノズル形状の磁力線に沿って輸送される過程で、多様な自発的プラズマ加速、運動量変換過程が起こり推力発生に寄与する。一方で、磁力線は閉ループ構造を形成しているため、宇宙空間で推力を発生するためには、プラズマ流を磁力線から離脱し、宇宙空間へと運動量放出する必要がある。本研究ではこのプラズマ離脱現象の発現と制御に関する室内実験を実施し、その物理過程を検証するとともに、推進機の高性能化を進め、磁気ノズル中のプラズマダイナミクスの解明と無電極電気推進機の実用化に向けた研究を展開することを目的とする。

2. 研究の内容(手法、経過、評価など)

本研究では、高密度プラズマ流による磁気ノズルの変形現象の検証とプラズマ流特性との関連性を理解することで、離脱現象に向けた基礎物理現象と課題を明らかにする。今回の実験においては、磁気ノズル中に高密度プラズマ流を形成し、プラズマ流によって変形される磁場構造の同定を行う必要がある。これを実現するためにはプラズマ生成部でのプラズマ損失抑制や磁気ノズル中への高効率プラズマ輸送がキーテクノロジーとなる。そこで本研究では、これらの課題に対して体系的に実験研究を展開し、合わせて推進性能の向上に関する研究開発を進めた。

【実験装置】

図1に示すように、内径1m、長さ2mの比較的大型の真空容器内に、変形振り子型の推力計測機とヘリコンプラズマ推進機を設置し、高周波回路、絶縁構造等を改良し、最大7kWの電力をパルスまたは準定常的(~10秒)に投入可能な状態とした。図中ソレノイドコイルによって磁場を印加した際の磁力線構造を示している。下流域(zが正の方向)においてノズル形状の磁力線が形成され、プラズマ流はこの構造に沿って下流域へと流れる。プラズマ流によって推力が発生すると、磁力線を含む推進機構造が力を受け振り子に変位する。この変位量をレーザーによって計測することで、推力計測が可能となる。また本研究独自の手法で、磁気ノズルに起因する推力成分や、幾何学的構造に加わる推力成分の分解計測を実施した。プラズマパラメータや変形磁場の評価に対しては、各種静電プローブや磁気プローブ、分光計測を用いた。

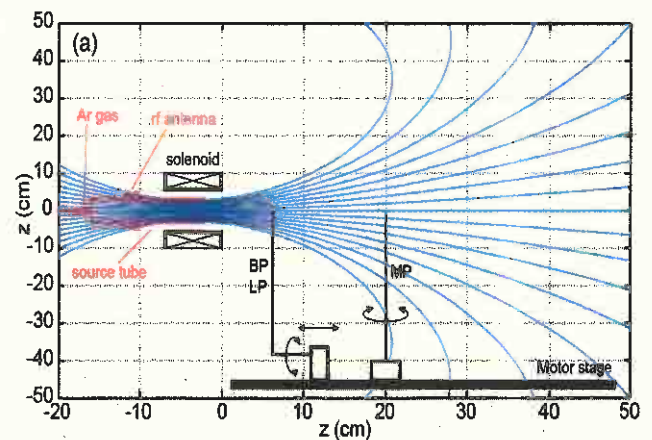


図1：典型的な実験装置概略図。

2. 研究の内容(続き)(書ききれない場合には、同一形態のページを追加しても結構です)

【1- プラズマ源内部での運動量損失機構】

プラズマ源下流に高密度プラズマを生成するために、まずは動作ガスをArに加えて電離が容易なKr, Xeを用いて実験を行ったところ、高密度プラズマの生成が可能であるが、得られる推力には変化が見られなかった。この原因を探る過程で、下記に示すような新たなプラズマ運動量損失機構が明らかとなった。

図2は、プラズマ生成部の軸方向壁面(Ts)および径方向壁面(Tw)へと加わる力のz軸方向成分の分解計測結果であり、高密度プラズマ生成が可能で、KrやXeの場合には、径方向に推力を減少させる力が働いていることが明らかになった。この条件においてプラズマ密度のz軸方向分布を計測したところ(図3)、Kr, Xeの場合にはプラズマ源出口近傍にて急激な密度勾配が形成されていることが観測された。密度勾配が形成されると、ボルツマン法則に従って軸方向電場が形成され、電子圧力からイオンの動的運動量への変換に相当する静電イオン加速が起こり、イオンの軸方向運動量が増加する。磁力線による径方向閉じ込め効果が表れにくいイオンが径方向壁面へと損失する際に、軸方向運動量も同時に損失させていることが明らかとなった(図4)。

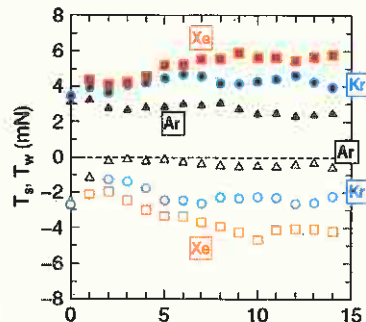


図2: プラズマ生成部の軸方向壁面(Ts)および径方向壁面(Tw)へと加わる力のz軸方向成分の分解計測結果. [Phys. Rev. Lett., 114, 195001]

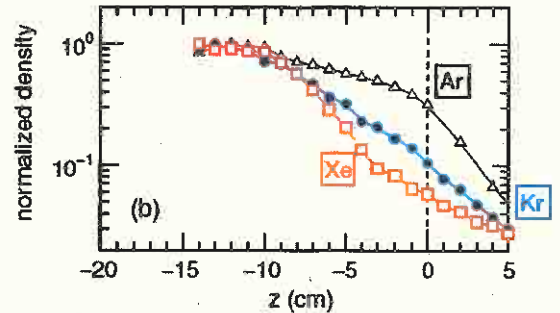


図3: 最大値で規格化したプラズマ密度のz軸方向分布. [Phys. Rev. Lett., 114, 195001 (2015).]

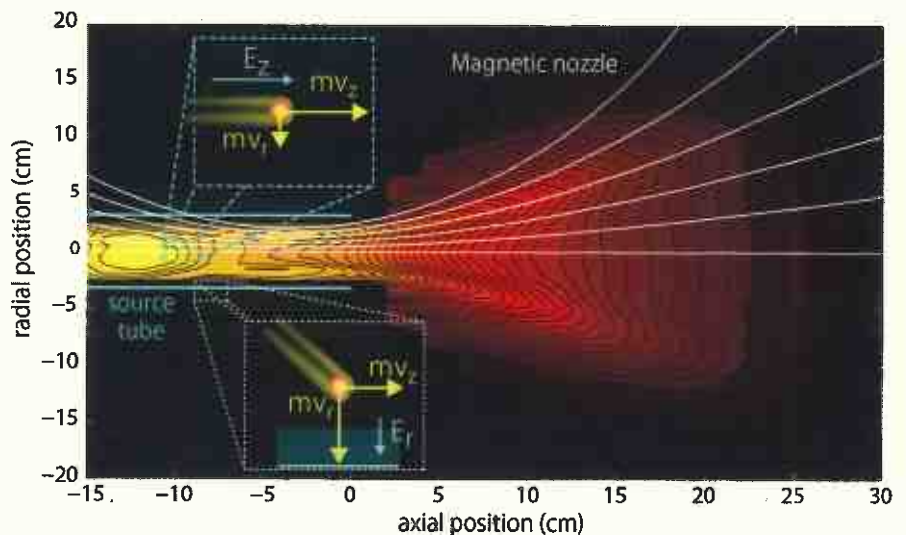


図4: 新規プラズマ運動量損失機構の概略図. [Phys. Org, 掲載]

<https://phys.org/news/2015-05-degradation-mechanism-helicon-plasma-thruster.html>

【2- 中性粒子枯渇によるプラズマ構造形成】

上記で示した損失機構を抑制し、磁気ノズル中に高密度プラズマ流を生成するために、密度勾配形成メカニズムに関して実験を行った。ここではArプラズマで高周波電力を最大5kWまで増強して実験を実施した。プラズマ源出口近傍で中性粒子密度の計測を分光法によって実施したところ、電力の増加に伴い、中性粒子密度が減少することが観測され(図5)、中性粒子枯渇と呼ばれる現象が起きていることが明らかになった。本実験ではプラズマ源上流域(図1,4中左側)からガスを導入しており、高密度プラズマ生成時には中性粒子ガスの電離の結果、プラズマ源出口近傍の中性粒子密度が減少していることが明らかになった。

またこの際のプラズマ密度の時空間構造(z-t)を計測したところ、ガスが充満した状態では超高密度プラズマの形成が可能であることが明らかとなり(図6)、本研究の大きな目的の一つであり後述する磁力線変形現象に関する実験が推進できる可能性が示唆されたといえる。

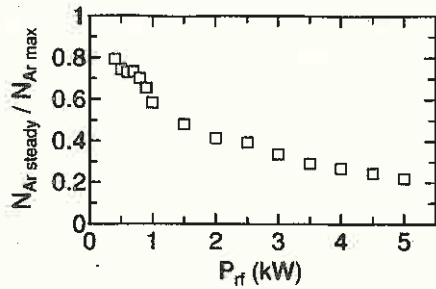


図 5: 定常状態におけるアルゴン中性粒子密度の高周波電力依存性. [Appl. Phys. Lett., 108, 074103 (2016).]

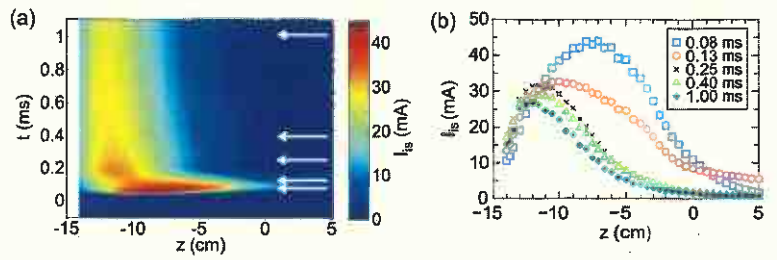


図 6: (a) プラズマ密度 z 軸方向分布の時間発展計測結果. (b) 代表的な時間でのプラズマ密度 z 軸方向分布. [Appl. Phys. Lett., 108, 074103 (2016).]

プラズマ流による磁力線変形現象と離脱

図 7 は、プラズマ密度およびプラズマによって誘起される軸方向磁場 ΔB_z の時空間発展の計測結果である。プラズマ流がプラズマ源から進展する過程において、プラズマ源出口近傍では $\Delta B_z < 0$ となる領域が観測され、これまでに観測されてきた磁気ノズル中のプラズマの反磁性効果によって推力が増加する現象に相当している [Takahashi et al., Phys. Rev. Lett., 110, 195003 (2013)]. これは二つの磁石の N 極と N 極を向かい合わせに配置した際に生じる反発力と類似した物理描像である。

一方で、 $z > 20\text{cm}$ の下流域においては、プラズマ流の中心に $\Delta B_z > 0$ となる領域が存在していることが分かる。これはプラズマ流によって磁力線が伸長されていることを示しており (図 8), 初めてプラズマ流による磁気ノズルの伸長現象が観測されたといえる。

この反磁性(磁力線の発散に寄与)状態から磁力線の伸長状態への遷移条件を調べたところ、アルフェンマッハ数 M_A と呼ばれる指標が 0.2 程度で起こることが分かり(図 9), 過去数 10 年にわたり $M_A=1$ で起こりうると考えられてきた磁力線伸長が起こる条件とは異なることを示した。また理想電磁流体方程式を用いて、 $M_A < 1$ で起こる伸長現象に対する理論的解釈も与えることに成功した (図 9 中点線)。

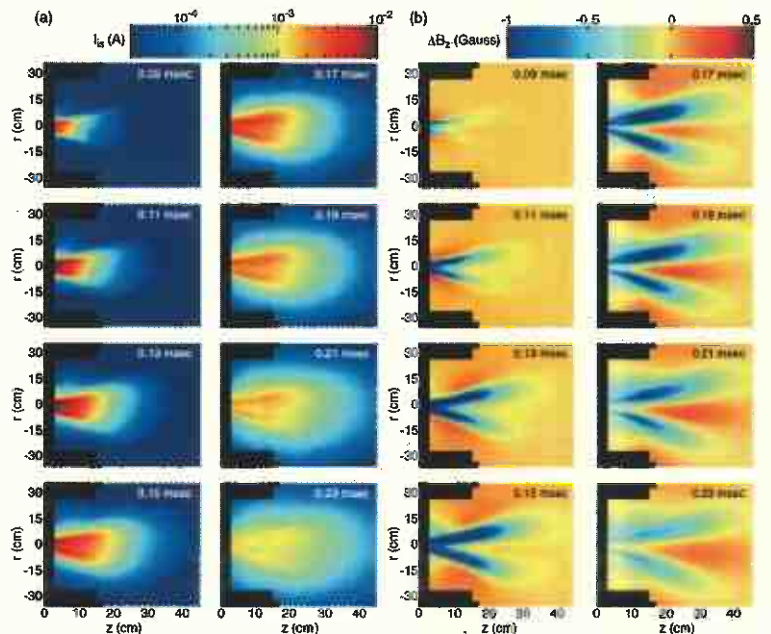


図 7: (a) プラズマ密度, (b) プラズマによって誘起される軸方向磁場 ΔB_z の時空間発展の計測結果. [Phys. Rev. Lett., 118, 225002 (2017)]

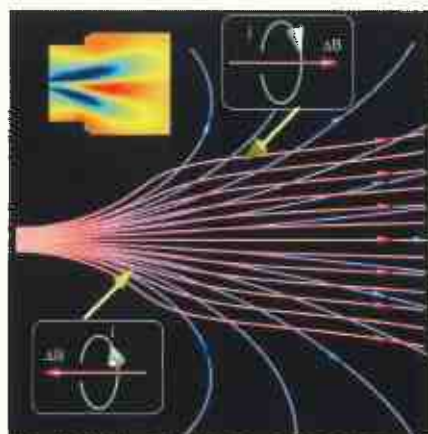


図 8: 磁力線の発散状態から伸長状態へ遷移するイメージ図. [Phys. Org 掲載] <https://phys.org/news/2017-06-road-electrodeless-spacecraft-propulsion.htm>

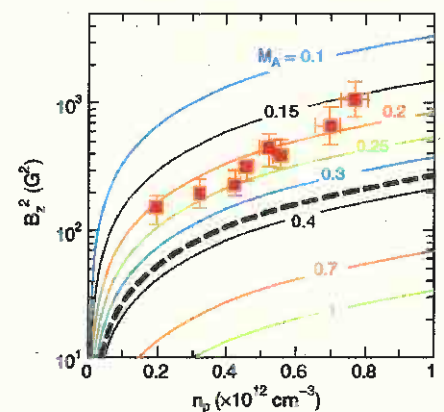


図 9: 状態遷移が起こる条件の計測結果とアルフェンマッハ数の計算値. 図中点線は、理想電磁流体モデルに基づく遷移条件の解析結果。

3. 研究の結論、今後の課題

【結論】

本研究では、磁気ノズルを用いた無電極電気推進機の開発へ向けて、磁気ノズルからのプラズマ離脱現象に関して、室内実験を中心とした研究展開を行った。その過程で下記の大きな成果を得た。

- 1- プラズマ生成部内において、従来のモデリングでは無視されていた軸方向運動量の径方向壁面への損失が、推進機性能を大きく低下させていることを明らかにした。
- 2- 上述の運動量損失を駆動する要因として、プラズマ生成部における自発的な電場形成、密度勾配形成があるが、この現象には大電力・低気圧プラズマ推進機でより顕著になる中性粒子枯渇現象が関連していることを明らかにした。また上記では割愛させて頂いたが、この運動量損失の抑制方法を提案した (Takahashi et al., Appl. Phys. Lett., 109, 194101 (2016) 参照)。
- 3- 磁気ノズル中に高密度プラズマ流を生成した際、プラズマ源出口近傍では推力増加に寄与する反磁性効果 (磁力線を発散させる効果)、磁気ノズル下流域では磁力線が伸長される現象を観測し、その遷移条件を実験的に明らかにした。これまでに予想されていたアルフェンマッハ速度が1を超える際に起こりうると考えられていた現象が、より低いアルフェンマッハ数で起こることを明らかにした。この現象に対して理論的解釈も与えているため、今後動作パラメータに応じた磁気ノズル設計に有用な知見である。

【今後の課題】

磁力線の変形現象に関して世界で初めて観測することに成功したが、磁場強度の変化は外部磁場の数%にとどまっているのが現状である。上記で構築した理論を基盤として、より大きく変形可能なパラメータを模索する必要がある。またその際のプラズマの流れ場計測・解析など、基礎的な課題も残っているため、着実に研究を進展させる必要がある。

これまでの研究は基礎的な研究に主軸をおいて進めてきたが、今回の成果を踏まえて、宇宙空間において推力を発生可能である可能性が見えたため、衛星・探査機へ搭載するための工学的研究開発フェーズへと移行していく時期が来たといえる。特に高周波システムの小型化、ソレノイドコイルの重量・電力削減、軽量化等多くの課題を有しているため、他分野の技術の導入を図りながら、持続的な研究開発を推進していく。

4. 成果の価値(とくに判りやすく書いて下さい)

4. 1. 社会的価値

独創的かつ世界を牽引する電気推進機開発を進められたことは、我が国からの新技術・新学術的知見の発信につながったといえる。現在、衛星通信、新宇宙探査、月面基地、有人火星探査等、商業利用も含めて宇宙開発の多様性が増している状況にある。その中で、宇宙空間における推進・輸送システムの開発は根幹的な技術であるため、その社会的価値は大きいと思われる。またこの研究を通して得られたプラズマ生成制御に関する知見は、推進機にとどまらず、半導体、磁気デバイス、パワーデバイス作成プロセス等の地上産業へも貢献する技術であるため、多岐にわたる分野へと波及する可能性を有しており、今回の課題の推進と並行して、新たな研究展開を進めている。

4. 2. 学術的価値

磁力線の伸長現象は、電磁流体学によるとアルフェンマッハ数が1を超える条件で起こると考えられてきた。一方で今回の実験を通して、プラズマパラメータによってその伸長状態へと遷移する条件が変化することが分かり、大きな発見であった。またこれを室内実験で調べるために推進機構造の改良が必要となり、その結果、新規運動量損失機構の発見などにもつながったため、学術的価値は高いと考えられる。これらの成果は、物理学分野でトップレベルの学術雑誌 *Physical Review Letters* 数編へ掲載されるなど、客観的な評価も得ているといえる。単純化したモデルで理論的に磁力線伸長現象が起こるモデルを提唱したことで、その物理的な解釈が大きく進んだとともに、今後の実験へもフィードバックがかかり、今後の研究開発が加速すると期待される。

4. 3. 成果論文(本研究で得られた論文等を年代順に書いて下さい。未発表のものは公表予定を書いて下さい)

- 1- [Kazunori Takahashi](#), Aiki Chiba, and Akira Ando, "Modifications of wave and plasma structures by a mechanical aperture in a helicon plasma thruster", *Plasma Sources Science and Technology*, **23**, 064005 (2014).
- 2- [Kazunori Takahashi](#) and Akira Ando, "Observation of stationary plasma striation and collimated plasma transport in a 100 kHz inductively coupled plasma discharge", *IEEE Transactions on Plasma Science*, **42**, 2784 (2014).
- 3- [Kazunori Takahashi](#), Christine Charles, Rod W Boswell, and Akira Ando, "Effect of magnetic and physical nozzles on plasma thruster performance", *Plasma Sources Science and Technology*, **23**, 044004 (2014).
- 4- [Kazunori Takahashi](#), Taisci Motomura, Akira Ando, Yuji Kaasashima, Kazuya Kikunaga, Fumihiko Uesugi, and Shiro Hara, "Transport of a helicon plasma by a convergent magnetic field for high speed and compact plasma etching", *Journal of Physics D: Applied Physics*, **47**, 425201 (2014).
- 5- [Kazunori Takahashi](#), Christine Charles, Rod W Boswell, and Akira Ando, "Experimental identification of thrust components imparted by an electrodeless helicon plasma thruster", *Transactions of JSASS, Aerospace Technology Japan*, **12**, Pb1-Pb6 (2014).
- 6- [Kazunori Takahashi](#), Christine Charles, Rod W Boswell, and Akira Ando, "Current-free plasma thruster controlling cross-field diffusion under a magnetic nozzle", *JPS Conference Proceedings*, **1**, 015008 (2014).
- 7- [Kazunori Takahashi](#), Atushi Komuro, and Akira Ando, "Low-pressure, high-density, and supersonic plasma flow generated by a helicon magnetoplasma dynamic thruster", *Applied Physics Letters*, **105**, 193503 (2014).
- 8- [Kazunori Takahashi](#), Tatsuya Suzuki, and Akira Ando, "Large diameter permanent-magnets-expanded plasma source for spontaneous generation of low-energy ion beam", *Review of Scientific Instruments*, **85**, 02C101 (2014).
- 9- Yoshinori Takao and [Kazunori Takahashi](#), "Numerical validation of axial plasma momentum lost to a lateral wall induced by neutral depletion", *Physics of Plasmas*, **22**, 113509 (2015).
- 10- Rod W. Boswell, [Kazunori Takahashi](#), Christine Charles, and Igor D. Kaganovich, "Non-local electron energy probability function in a plasma expanding along a magnetic nozzle", *Frontiers in Physics*, **3**, 14 (2015).
- 11- Aiki Chiba, [Kazunori Takahashi](#), Atushi Komuro, and Akira Ando, "Characterization of Helicon Plasma Thruster Performance Operated for Various Rare Gas Propellants", *Journal of Propulsion and Power*, **31**, 962 (2015).
- 12- [Kazunori Takahashi](#), Atushi Komuro, and Akira Ando, "Measurement of plasma momentum exerted on target by a small helicon plasma thruster and comparison with direct thrust measurement", *Review of Scientific Instruments*, **86**, 023505 (2015).
- 13- [Kazunori Takahashi](#), Hiroki Higashiyama, Koichi Takaki, and Akira Ando, "Testing a sheath compensated Langmuir probe in geometrically and magnetically expanding plasmas", *Japanese Journal of Applied Physics*, **54**, 01AB01 (2015).
- 14- [Kazunori Takahashi](#), Aiki Chiba, Atsushi Komuro, and Akira Ando, "Axial Momentum Lost to a Lateral Wall of a Helicon Plasma Source", *Physical Review Letters*, **114**, 195001 (2015).
- 15- [Kazunori Takahashi](#), Atsushi Komuro, and Akira Ando, "Effect of source diameter on helicon plasma thruster performance and its high power operation", *Plasma Sources Science and Technology*, **24**, 055004 (2015).

- 16- Kazunori Takahashi, Yoshinori Takao, and Akira Ando, "Modifications of plasma density profile and thrust by neutral injection in a helicon plasma thruster", *Applied Physics Letters*, **109**, 194101 (2016).
- 17- Kazunori Takahashi, Sho Takayama, Atsushi Komuro, and Akira Ando, "Standing Helicon Wave Induced by a Rapidly Bent Magnetic Field in Plasmas", *Physical Review Letters*, **116**, 135001 (2016).
- 18- Kazunori Takahashi, Aiki Chiba, Atsushi Komuro, and Akira Ando, "Experimental identification of an azimuthal current in a magnetic nozzle of a radiofrequency plasma thruster", *Plasma Sources Science and Technology*, **25**, 055011 (2016).
- 19- Kazunori Takahashi, Yoshinori Takao, and Akira Ando, "Neutral-depletion-induced axially asymmetric density in a helicon source and imparted thrust", *Applied Physics Letters*, **108**, 074103 (2016).
- 20- Kazunori Takahashi, Atsushi Komuro, and Akira Ando, "Operating a magnetic nozzle helicon thruster with strong magnetic field", *Physics of Plasmas*, **23**, 033505 (2016).
- 21- Kazunori Takahashi and Akira Ando, "Enhancement of axial momentum lost to the radial wall by the upstream magnetic field in a helicon source", *Plasma Physics and Controlled Fusion*, **59**, 054007 (2017).
- 22- Kazunori Takahashi, "Thrusters: Current-Free Plasma", *Encyclopedia of Plasma Technology*, **1**, 1462 (2017).
- 23- Kazunori Takahashi, Yudai Nakano, and Akira Ando, "Frequency-tuning radiofrequency plasma source operated in inductively-coupled mode under a low magnetic field", *Journal of Physics D: Applied Physics*, **50**, 265201 (2017).
- 24- Kazunori Takahashi and Akira Ando, "Laboratory Observation of a Plasma-Flow-State Transition from Diverging to Stretching a Magnetic Nozzle", *Physical Review Letters*, **118**, 225002 (2017).