

様 式 C - 1 9、F - 1 9 - 1、Z - 1 9 (共通)

科学研究費助成事業 研究成果報告書



令和 2 年 6 月 1 1 日現在

機関番号 : 1 3 4 0 1

研究種目 : 若手研究(B)

研究期間 : 2017 ~ 2019

課題番号 : 1 7 K 1 7 7 6 4

研究課題名 (和文) ミリ波ビーミング推進に資する300 GHz 大電力ミリ波放電特性の研究

研究課題名 (英文) Investigation of the 300 GHz millimeter-wave discharge for the millimeter-wave beamed energy propulsion

研究代表者

福成 雅史 (Fukunari, Masafumi)

福井大学・遠赤外領域開発研究センター・助教

研究者番号 : 8 0 7 8 6 0 7 0

交付決定額 (研究期間全体) : (直接経費) 3,400,000 円

研究成果の概要 (和文) : ビーミング推進は既存の化学推進に代わる安価な宇宙輸送手法として期待されている。特にミリ波帯では大電力高効率の発振器ジャイロトロンが使用でき有用である。推力生成の核となるミリ波放電は電離閾値より低い電界強度中で自己組織化されたフィラメント状の構造をもって進展していく。そこで本研究では303 GHz の大電力ジャイロトロンを光源として用い、ミリ波放電の放電構造を高い時間・空間分解能で調べた。その結果、超臨界条件での1/4波長構造から亜臨界条件での櫛状プラズマ構造へ変化する過程の観測に世界で初めて成功した。さらにシャドウグラフによりプラズマ周辺での衝撃波の形成とその伝播を可視化した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ミリ波放電で現れる自己組織化された構造は気体の電離閾値に比べミリ波の局所電界強度が高い超臨界条件 (着火部) と、低い亜臨界条件で異なる。亜臨界条件でのミリ波放電は既存の電離モデルでは説明できず、また衝撃波通過後のガスを電離波面が進展するので複雑である。本研究ではミリ波放電が着火部の超臨界条件から亜臨界条件に遷移していく過程を観測した。この観測結果を通して、プラズマ表面での回折波が櫛状の放電構造を形成することを示した。さらにシャドウグラフにより同条件におけるプラズマ周辺での衝撃波形成過程を捉えた。これらのデータはミリ波ビーミング推進にとって重要なミリ波放電の電離モデル開発に寄与する。

研究成果の概要 (英文) : The beamed energy propulsions are attractive for the future low-cost mass-transportation to the space as alternatives to the chemical propulsions. A mega-watt class oscillator, gyrotron is currently available in the millimeter-wave range. The millimeter-wave discharge is a key factor of the thrust generation process. The ionization front propagates in the electric field lower than the ionization threshold and self-organized filamentary structures are created in the discharge. In this study, we investigated the millimeter wave discharge with high spatial and time resolution using a 303 GHz high-power gyrotron as a beam source. We observed the transition between two types of filamentary plasma arrays from the quarter-of-the-wavelength ($\lambda/4$) structure at the focal point to the comb-shaped array parallel to the incident beam with spacing of 0.96λ for the first time. In addition, the shock wave formation and propagation was visualized by the shadowgraph.

研究分野 : プラズマ科学

キーワード : ミリ波放電 自己組織化 ジャイロトロン プラズマ計測 マイクロ波ロケット シャドウグラフ 衝撃波

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様 式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19（共通）

1．研究開始当初の背景

宇宙輸送には 1950 年代の打ち上げ開始当初から今日に至るまで化学推進ロケットが使用されてきた。しかし化学推進は単位質量当たりの燃料自体が持つ化学エネルギーにより燃料を加速するため性能に上限があり、既存のロケットはすでにその上限に達している。遠隔からレーザーやミリ波を用いて飛行に必要なエネルギーをロケットに伝送するビーミング推進は化学推進に代わる新しい宇宙輸送手法として期待されている。ビーミング推進ロケットはエネルギー源が外部にあるため、化学推進ロケットのような理論的制約がなく、機体質量に無関係にエネルギーを増やすことができる。また地上に建設するビーム発振基地は繰り返し使用できメンテナンスも容易であることから、化学推進に比べ打ち上げ費用を大幅に低減できると期待されている。

ビーミング推進ロケットのアイデアは 1972 年に Kantrowitz らが提案したレーザー推進ロケットに遡る。¹その後、1980 年代の核融合分野における大電力ミリ波発振管ジャイロトロン開発に伴い、ミリ波ビーミング推進の研究が行われ始めた。申請者は大電力ミリ波源ジャイロトロンをビーム源として飛行するマイクロ波ロケットを提案し推力生成試験を行ってきた。図 1 は申請者のグループが行ったミリ波ビーミング推進ロケット(マイクロ波ロケット)打ち上げ試験の様子である。^{2,3}ジャイロトロンは既に 1 MW 出力/電力変換効率 55%/1 時間運転など高い性能を実現しておりビーミング推進のビーム源として有用である。⁴

マイクロ波ロケットの核となるのは、筒形の推進器内部で発生するミリ波放電である。筒形の推進器先端には集光器が搭載されており、その集光点で放電が発生する。その放電の電離波面は後続のミリ波を吸収しながら衝撃波を伴って進展し、その際の高圧によって機体は推力を得る。

ミリ波放電はフィラメント状の自己組織化された構造を持つ。気体の電離閾値に対する入射電界強度によって、ミリ波放電は超臨界条件と亜臨界条件に分けることができる。超臨界条件は電界強度が電離閾値より高く集光器の集光点での状態に相当する。この条件では、まず絶縁破壊により発生したプラズマの表面からの反射波と入射波によってプラズマ前面に定在波が形成される。プラズマ表面から $1/4$ 波長離れた定在波の腹で拡散によって広まった電子が存在すればミリ波吸収により新たな放電が起こる。入射ミリ波の進行方向と電界方向に平行な電界面では、電界方向のプラズマ端部に強い電界強度が発生し電界方向に延びたプラズマフィラメント形成される。新たに着火したプラズマフィラメントの電子密度がミリ波を反射するのに十分高くなると新しい定在波を形成する。このため電界面での時間積分画像では $1/4$ 波長ごとに並んだ離散的な構造が現われ、入射ミリ波の磁界方向に平行な磁界面での積分画像では、粒状のプラズマが三角格子状に並ぶ。この構造を $1/4$ 波長構造と呼ぶ。一方で、集光点から離れた位置でも集光点のプラズマを種として、電離波面は電離閾値より 3 桁程度低い電力密度中を、放電を維持しながら進展していく。この条件を亜臨界条件と呼ぶ。亜臨界条件でも $1/4$ 波長構造とは異なるフィラメント状の構造が観測される。マイクロ波ロケットの推進器内部で発生するミリ放電は亜臨界条件でありミリ波から推力へ変換過程の理解や最適化に対し特に重要である。

ミリ波放電の研究は 1980 年代よりジャイロトロンを発明したロシアの Institute of Applied Physics のグループにより開始され、自己組織化された構造形成の観測や電離波面進展速度の計測が行われてきた。近年でもミリ波放電から発生する紫外光の光源利用を目的として継続的に研究が行われている。⁵⁻⁷2008 年には米国 MIT の Hidaka らにより 110 GHz/1.5 MW 出力のジャイロトロンを用いてミラーの集光点付近の超臨界条件において自己組織化するミリ波放電構造の詳細な観測が行われ Phys. Rev. Lett 誌に掲載された。⁸Hidaka らの実験結果はフランスの Toulouse 大学のグループにより数値計算との比較が行われ、超臨界条件での上述の放電構造形成メカニズムが明らかにされた。⁹東京大学ではマイクロ波ロケットへの応用を目指して 170 GHz のミリ波放電について試験を行っている。^{10,11}

超臨界条件での放電は数値計算でも再現され電離波面進展や構造形成メカニズムはほぼ明らかになっている一方、亜臨界条件では既存の電離モデルでは電離波面の進展を再現することができない。近年、プラズマ周辺の重粒子(ガス)を考慮した数値計算からプラズマの加熱によるガス密度低下が電離閾値を下げていているとの指摘がなされた。¹²しかし放電を維持するには大気圧の $1/100$ 程度にまで密度が低下していることが必要であり、電離波面の伸展速度も実験とは異なる。

ミリ波帯において唯一実験室規模で大電力発振可能な光源であるジャイロトロンは核融合プラズマの加熱デバイスとして主に研究開発が行われていたため、ミリ波放電の実験数は少なく、特に亜臨界条件では数値計算の検証に使えるデータがほぼ無いのが現状である。

2．研究の目的

(1)ミリ波放電構造の詳細な計測

亜臨界条件のミリ波放電は超臨界条件の放電より遷移していくと考えられるが、一つの周波数で超臨界条件から亜臨界条件まで放電構造を計測した例はない。また亜臨界条件での電界面

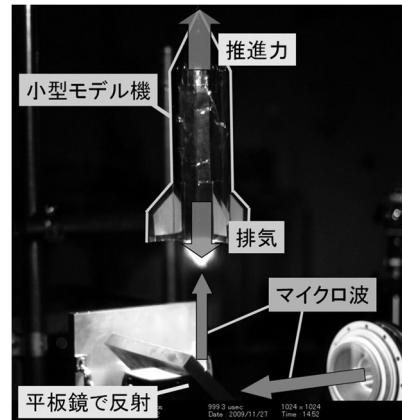


図 1 マイクロ波ロケットの打ち上げ試験。推力生成を実証。

と磁界面での放電構造の違いを調べた研究も存在しない。そこで可能な限り高い時間・空間分解能でミリ波放電を着火の瞬間から電界面・磁界面の両面で観測する。

(2) 衝撃波形成過程の可視化計測

超臨界条件では電離波面進展速度が音速に比べ極端に速いため衝撃波は亜臨界条件への遷移後に形成され、電離波面は衝撃波通過後の気体中を進展してくと考えられる。しかしこの衝撃波の形成過程を計測した研究は無い。そこで衝撃波を可視化して計測を行う。

3. 研究の方法

図2にミリ波放電実験系の写真を示す。ミリ波光源として福井大学遠赤外領域開発研究センターで開発した 303 GHz 大電力ジャイロトロンを用いた。¹³ ジャイロトロンから出力したミリ波は2枚の凹面鏡と2枚の平板ミラーを通して軸対象ガウシアンプロファイルに整形され集光用の放物面鏡に正面から入射する。放物面鏡は直径 50 mm、焦点距離 18 mm のものを用いた。入射ミリ波の電力は水負荷による計測から 104 kW と見積もった。赤外線カメラを用いた放射パターン計測より放物面鏡位置でのビームスポットサイズと曲率半径はそれぞれ 14.15 mm、667 mm と見積もった。これらの計測から放物面鏡位置でのピーク電力密度は 33 kW/cm^2 となる。

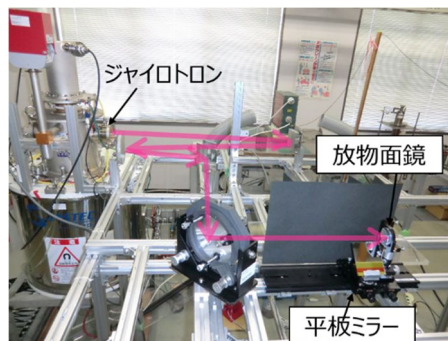


図2 ミリ波放電実験系

(1) ミリ波放電構造の詳細な計測

ミリ波放電構造の計測には、ハイスピードシャッターカメラ Pixelfly・USB を放物面鏡と同じ高さで入射ミリ波ビームに対し垂直に設置した。ジャイロトロン出力窓においてミリ波の電界方向は地面に平行であるため、カメラの正面は磁界面となる。放物面鏡の下に架台の上面に対して 45° を成すように平面鏡を設置し、電界面での放電構造は鏡像として計測した。カメラの記録画素数は $1392 \times 1040 \text{ pixel}$ 、波長感度は 290-1100 nm、露光時間は $1 \mu\text{s}$ から 60 s の間で設定することができる。ミリ波照射後の放電開始タイミングは光センサを用いて放電からの発光を計測することにより判断した。

(2) 衝撃波形成過程の可視化計測

衝撃波の可視化手法としてシャドウグラフを用いた。HeNe レーザーをプローブ光としてミリ波ビームに対し垂直に入射しミリ波放電を観測した。プラズマからの自発光は半値全幅が 10 nm のバンドパスフィルターを用いて除去した。シャドウグラフ計測とミリ波放電開始タイミング取得には(1)と同じハイスピードシャッターカメラと光センサを用いた。

4. 研究成果

(1) 超臨界条件から亜臨界条件への遷移について

放物面鏡の集光点におけるミリ波放電構造の計測では図3に示す典型的な $1/4$ 波長構造を観測することに成功した。 $1/4$ 波長構造の計測としてはこれまで報告された中で最も高い周波数である。この時電離波面は光源側ではなく放物面鏡に向かって進展している。さらにミリ波のパルス幅を伸ばしていくと、超臨界条件で形成された入射ミリ波に平行なフィラメントは粒状に別れていく。着火よりおよそ $10 \mu\text{s}$ 程度経過すると電界面と磁界面での放電構造の違いはほぼ無くなる。その後 $20 \mu\text{s}$ 程度経過すると電界面においてミリ波光源側にミリ波の入射方向と平行なフィラメントが形成され光源に向かって進展していく(図4上)。この時、フィラメント間の間隔は 0.92 波長とおよそ波長程度となった。文献¹⁴ではこの櫛状構造が人工的な電離項を用いた 170 GHz でのミリ波放電の数値計算で予想されている。

(2) 亜臨界条件のミリ波放電における電界面と磁界面での構造の違いについて

電界面では上述のフィラメントが形成されたが、磁界面ではフィラメント形成は見られず拡散的な構造が観測された。このため3次元の

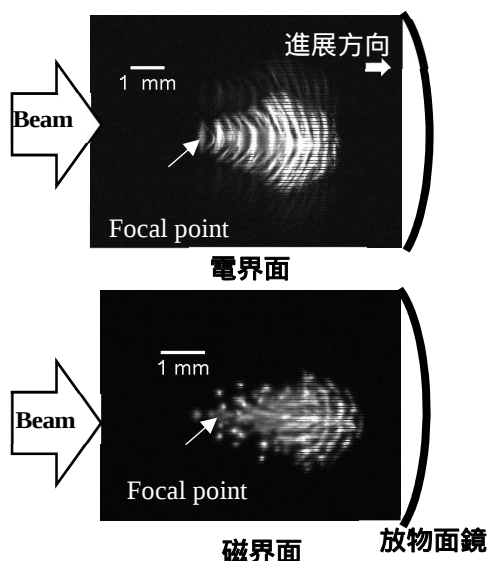


図3 集光点で観測された $1/4$ 波長構造

にはフィラメント上ではなく多層的な構造をなしていると考えられる。さらに $60\ \mu\text{s}$ 程度経過すると図 4 下に示すように磁界面では先端が尖った構造を取ることが分かった。

亜臨界条件でのミリ波放電ではこれまでこのような電界面と磁界面の構造の違いは報告されていない。この放電構造の違いがミリ波放電に一般的なものなのか、本研究で用いた $303\ \text{GHz}$ の周波数において特有のものなのか今後の検証が必要である。

(3)電離波面進展速度について

放物面鏡に向かう電離波面の進展速度は $3.7\ \text{km/s}$ から $350\ \text{m/s}$ に低下する。この電離波面進展は放電プラズマの端部を回りこんで放物面鏡で集光されたミリ波によって支持されていると考えられる。光源側に向かう電離波面の進展速度を図 5 に示す。既存研究では電離波面進展速度は入射電力の増加に伴い増加するとされる。しかし $303\ \text{GHz}$ における実験では、図に示すように亜臨界条件における櫛状プラズマが形成されると電離波面進展速度は減少した。フィラメント形成は干渉によりプラズマ全面でのミリ波強度を強めると考えられるので、これは先行研究と矛盾する結果である。この進展速度減少の原因は明らかになっていない。

(4) 亜臨界条件における櫛状の放電構造形成メカニズム

文献¹⁾のように人工的な電離モデルを用いた数値計算でも櫛状の放電構造を再現できていることから、キルヒホッフの回折式より電界強度の分布を計算する。計算ではプラズマの電子数密度は十分に高いとしプラズマを伝導体として取り扱う。

図 6 に電界分布の計算結果を示す。プラズマがある領域は図中に白で示されている。7つのプラズマフィラメントの先端部分を直線状に配置した。 y 方向と z 方向は波長 λ で規格化されている。電界強度もプラズマ上の電界強度を 1 として規格化している。フィラメントごとの間隔は λ 、プラズマの幅は 0.8λ とした。放電構造は x 方向のプラズマの幅には大きく依存しない。この時、プラズマ表面からの回折によりおおよそ波長ごとの周期を持った干渉縞が形成されており、その強度ピークがプラズマと同じ位置となることが分かる。プラズマの幅が波長より大きい場合でも同様に波長程度の間隔の強度ピークを持つ干渉縞が形成されるため、フィラメントもそれに従って形成される。

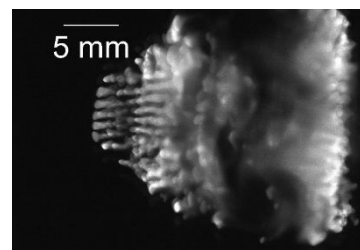
研究成果(1)~(4)は国際学術論文誌 Scientific Reports にて論文として発表した。

(5)衝撃波形成過程と衝撃波伝播速度

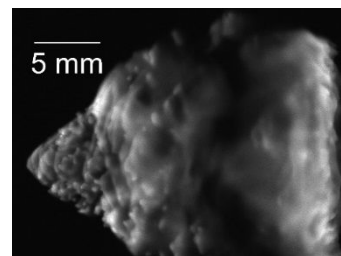
シャドウグラフによってプラズマ周辺の圧力波を可視化した。まず超臨界条件の放電ではプラズマの加熱による僅かな擾乱のみ観測された。着火よりおおよそ $3\ \mu\text{s}$ 経過後に不明瞭ながら衝撃波面の形成が観測された。着火より $7\ \mu\text{s}$ 経過後には電離波面と衝撃波面は離れて伝播しておりフィラメント構造形成に対し衝撃波の影響は少ないと考えられる。ただし、電離波面は衝撃波通過後の気体中を進展するので衝撃波速度の計測は重要な意味を持つ。この実験では衝撃波の伝播速度は $402\ \text{m/s}$ と見積もられた。この結果より、ランキン・ユゴニオの関係式を用いて衝撃波背後圧は 1.4 気圧程度に昇圧されることが分かった。

(6)反射衝撃波

プラズマ着火よりおおよそ $50\ \mu\text{s}$ の時点で放物面鏡で反射したと思われる反射衝撃波が観測さ



電界面



磁界面

図4 亜臨界条件でのミリ波放電におけるフィラメント構造

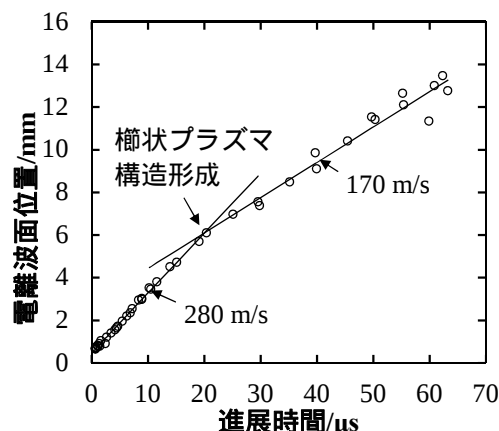


図5 時間ごとの電離波面位置と進展速度

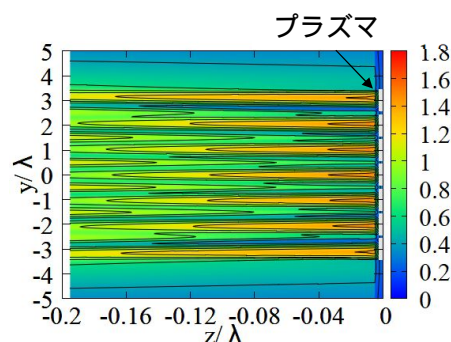


図6 規格化電界強度の計算結果

れた。この反射衝撃波の伝播速度は 365 m/s であり電離波面進展速度より速く電離波面に追いつくことができる。今回の計測では 62 μ s 程度でミリ波パルスターンオフしているが、マイクロ波ロケットの推進器内部では衝撃波背後の流体は加速されているため電離波面通過後に加速し先頭の衝撃波に追いつき先頭衝撃波を強めると考えられる。

<引用文献>

- A. Kantrowitz, Propulsion to Orbit by Ground-Based Lasers, *Astronautics and Aeronautics*, Vol. 10, 1972, 74-76.
- 小紫公也、福成雅史、マイクロ波ロケットの現状と展望、*プラズマ・核融合学会誌*、92 巻、5 号、2016、323-331.
- M. Fukunari, N. Wongsuryrat, T. Yamaguchi, Y. Nakamura, K. Komurasaki, H. Koizumi, Design of a Millimeter-wave Concentrator for Beam Reception in High-power Wireless Power Transfer, *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, Springer, Vol.38, Issue 2, 2017, 176-190.
- K. Sakamoto, A. Kasugai, K. Takahashi, R. Minami, N. Kobayashi, K. Kajiwara, Achievement of robust high-efficiency 1 MW oscillation in the hard-self-excitation region by a 170 GHz continuous-wave gyrotron, *Nature Physics*, Vol.3, 2007, 411-414.
- A. L. Vikharev, V. B. Gil'denburg, S. V. Golubev, G. G. Eremin, O. A. Ivanov, A. G. Litvak, A. N. Stepanov, A. D. Yunakovskii, Nonlinear dynamics of a freely localized microwave discharge in an electromagnetic wave beam, *Soviet Physics JETP*, Vol.67, No.4, 1988, 724-728.
- V. L. Bratman, V. G. Zorin, Yu. K. Kalynov, V. A. Koldanov, A. G. Litvak, S. V. Razin, A. V. Sidorov, V. A. Skalyga, Plasma creation by terahertz electromagnetic radiation, *Physics of Plasmas*, Vol.18, 2011, 083507.
- M. Yu. Glyavin, S. V. Golubev, I. V. Izotov, A. G. Litvak, A. G. Luchinin, S. V. Razin, A. V. Sidorov, V. A. Skalyga, and A. V. Vodopyanov, A point-like source of extreme ultraviolet radiation based on a discharge in a non-uniform gas flow, sustained by powerful gyrotron radiation of terahertz frequency band, *Applied Physics Letters* Vol.105, 2014, 174101.
- Y. Hidaka, E. M. Choi, I. Mastovsky, M. A. Shapiro, J. R. Sirigiri, R. J. Temkin, Observation of Large Arrays of Plasma Filaments in Air Breakdown by 1.5-MW 110-GHz Gyrotron Pulses, *Physical Review Letters*, Vol.100, 2008, 035003.
- S. K. Nam, J. P. Verboncoeu, Theory of Filamentary Plasma Array Formation in Microwave Breakdown at Near-Atmospheric Pressure, *Physical Review Letters*, Vol.103, 2009, 055004.
- Y. Oda, K. Kajiwara, K. Takahashi, A. Kasugai, K. Sakamoto, K. Komurasaki, In-Tube Shock Wave Driven by Atmospheric Millimeter-Wave Plasma, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.48, 2009, 116001.
- Y. Oda, T. Yamaguchi, Y. Shiraishi, K. Komurasaki, K. Kajiwara, K. Takahashi, A. Kasugai, K. Sakamoto, A One-Dimensional Propagation of Shock Wave Supported by Atmospheric Millimeter-Wave Plasma, *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, Vol.32, 2011, 877-882.
- M. Takahashi, Y. Kageyama, N. Ohnishi, Joule-heating-supported plasma filamentation and branching during subcritical microwave irradiation, *AIP Advances*, Vol.7, 2017, 055206.
- T. Saito, Y. Yamaguchi, Y. Tatematsu, M. Fukunari, T. Hirobe, S. Tanaka, R. Shinbayashi, T. Shimozuma, S. Kubo, K. Tanaka, M. Nishiura, Development of 300 GHz Band Gyrotron for Collective Thomson Scattering Diagnostics in the Large Helical Device, *Plasma and Fusion Research*, Vol.12, 2017, 1206013.
- Y. Nakamura, K. Komurasaki, M. Fukunari, H. Koizumi, Numerical analysis of plasma structure observed in atmospheric millimeter-wave discharge at under-critical intensity, *Journal of Applied Physics*, Vol.124, 2018, 033303.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Fukunari Masafumi、Tanaka Shunsuke、Shinbayashi Ryuji、Yamaguchi Yuusuke、Tatematsu Yoshinori、Saito Teruo	4. 巻 9
2. 論文標題 Observation of a comb-shaped filamentary plasma array under subcritical condition in 303-GHz millimetre-wave air discharge	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 17972
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1038/s41598-019-54333-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 1件／うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Masafumi Fukunari
2. 発表標題 Structure Formation of the Millimeter-Wave Air Breakdown Plasma at 303 GHz
3. 学会等名 The 12th International Workshop on Plasma Application and Hybrid Functionally Materials/The 6th Workshop on Discharge Induced in High-Energy Electromagnetic Beam（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福成雅史，田中俊輔，新林竜志，山口裕資，立松芳典，斉藤輝雄
2. 発表標題 高速度カメラを用いた E 面と H 面での303 GHz ミリ波放電構造の詳細計測
3. 学会等名 第35回 プラズマ・核融合学会 年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masafumi Fukunari, Tetsuo Yokoyama, Shunsuke Tanaka, Ryuji Shinbayashi, Yuusuke Yamaguchi, Yoshinori Tatematsu, Teruo Saito, Kimiya Komurasaki
2. 発表標題 Experimental investigation on millimeter-wave discharge induced in gas
3. 学会等名 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1．発表者名 福成雅史、横山哲士、田中俊輔、新林竜志、廣部匠、山口裕資、立松芳典、斉藤輝雄
2．発表標題 303 GHz大電力ミリ波放電の電界面と磁界面での構造の違い及び超臨界条件から亜臨界条件への変化
3．学会等名 第62回宇宙科学技術連合講演会
4．発表年 2018年

1．発表者名 Masafumi Fukunari, Tetsuo Yokoyama, Shunsuke Tanaka, Ryuji Shinbayashi, Takumi Hirobe, Yuusuke Yamaguchi, Yoshinori Tatematsu, Teruo Saito
2．発表標題 Observation of the Discharge Structure in 303 GHz Millimeter-Wave Air Breakdown
3．学会等名 IRMMW-THz 2018 (国際学会)
4．発表年 2018年

1．発表者名 横山哲士、福成雅史、廣部匠、新林竜志、田中俊輔、山口裕資、立松芳典、斉藤輝雄
2．発表標題 303 GHz ミリ波大気放電の電界面と磁界面における構造と電離波面進展速度の電力密度依存性
3．学会等名 2017年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会
4．発表年 2017年

1．発表者名 福成雅史、横山哲士、廣部匠、新林竜志、田中俊輔、山口裕資、斉藤輝雄、立松芳典
2．発表標題 マイクロ波ロケットにおける亜臨界ミリ波放電構造の露光画像計測
3．学会等名 H29年度 宇宙輸送シンポジウム
4．発表年 2018年

1. 発表者名	Masafumi Fukunari, Ryota Kamiya, Kazuki Nakagawa, Yuusuke Yamaguchi, Yoshinori Tatematsu, Teruo Saito,
2. 発表標題	Investigation of the Millimeter-Wave Discharge under the Subcritical Condition for a MHD Wireless Power Transfer System
3. 学会等名	The 32nd International Symposium on Space Technology and Science (ISTS) (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	福成雅史, 田中俊輔, 新林竜志, 山口裕資, 立松芳典, 斉藤輝雄
2. 発表標題	シャドウグラフによる303 GHz ミリ波放電における衝撃波形成の計測
3. 学会等名	第36回 プラズマ・核融合学会 年会
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	福成雅史、山口裕資、立松芳典、斉藤輝雄
2. 発表標題	303 GHzミリ波放電構造と衝撃波の形成過程の観測
3. 学会等名	第8回「高エネルギー電磁ビームに誘起される放電とその工学的応用」ワークショップ
4. 発表年	2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	斉藤 輝雄 (Saito Teruo) (80143163)	福井大学・遠赤外領域開発研究センター・教授 (13401)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	立松 芳典 (Tatematsu Yoshinori) (50261756)	福井大学・遠赤外領域開発研究センター・教授 (13401)	
連携研究者	山口 裕資 (Yamaguchi Yuusuke) (10466675)	福井大学・遠赤外領域開発研究センター・助教 (13401)	