

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04203

研究課題名(和文) 超短パルス放電と物質の相互作用による新しい加速機構と次世代プラズマ推進機への応用

研究課題名(英文) Novel Acceleration Mechanisms and Plasma Propulsion Applications through Interactions of Ultra-short-pulse Discharges and Matters

研究代表者

堀澤 秀之(Horisawa, Hideyuki)

東海大学・工学部・教授

研究者番号：30256169

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,300,000円

研究成果の概要(和文)：超短パルス放電と物質の相互作用によりプラズマを生成および加速する方法は、全く新しい加速機構である。この場合従来の電気推進では不可能な静電加速/電磁加速(高比推力/高推力)の幅広い作動モードが期待できる。これらを実証するために、シングルパルス放電作動のシステム構築および推進性能評価実験を行った。従来の方式では、レーザーアブレーションプラズマ発生後の放電パルス発生が受動的で制御不可能であったが、これを能動的に制御する新たなパルス発生装置を開発した。さらに、連続パルス放電作動における推進性能評価実験を行い、推進剤にアルゴンガスをを用いた場合に最大比推力8,200 s(繰り返し周波数1 kHz)を得た。

研究成果の概要(英文)：Utilization of the interaction of very-short-pulse discharges and matters for plasma generation and acceleration is considered a significantly novel acceleration regime. With this regime, a wide range of operational modes of electrostatic/electromagnetic acceleration (high-Isp/high-thrust) can be expected. In this study, to demonstrate these characteristics, single-pulse discharge systems were developed and thrust performance with these systems were examined. With our conventional systems, it was impossible to actively control the passive discharge pulse generation after laser ablation plasma generation. To achieve the active control, a novel pulse generator was developed and tested. Moreover, thrust performance was examined for repetitive pulse operation modes, and the maximum measured specific impulse was 8,200 s (at repetition rate of 1 kHz).

研究分野：工学

キーワード：推進・エンジン 高パワー密度プラズマ源 高パワー電気推進 パルスプラズマ加速宇宙推進システム
ナノ秒短パルス放電プラズマ発生機 ナノ秒短パルス放電 ナノ秒短パルス放電発生電源 高繰り返し
プラズマ発生機

1. 研究開始当初の背景

超短パルス放電と物質との相互作用は、航空宇宙のフィールドにおける幅広い分野（内燃機関の点火器、排ガス浄化、飛翔体の境界層制御、半導体露光装置など）において革新的な波及効果を及ぼす高いポテンシャルを秘めており、産業応用という観点から極めて意義が大きい。

電気推進においては、約半世紀の間に考案された主たる加速機構（電熱加速、電磁加速、静電加速）の殆ど全てが実用化され商品化されるに至り、最近ではこれらの技術の大電力化および小電力化が注目されるようになってきた。一方で、新しい加速機構を創製する試みは国内外で精力的に進められているが、本課題の短パルス放電の例は皆無で、『第4の加速機構』といえる。研究代表者らは、これまで短パルス化により高効率で高比推力が得られることを確認した。さらに短い超短パルス幅（ピコ秒オーダー）のMHz級の高繰り返し放電は、更なる性能向上が見込まれるが、技術的には困難で、推進機への前例が皆無である。従って本課題は、加速機構のみならず電源技術も進化中という全く新しい電気推進方式を開拓することになる。

研究代表者らは、これまでの関連研究において、レーザー援用パルスプラズマ推進機の性能評価を実施し、マイクロ秒パルス作動で高比推力作動を確認した。また、短パルス作動（100 ns程度）に取り組み、短パルス化による高ピーク電流作動で更に高い比推力が発生可能であることを実証した。同時に更なる短パルス高ピーク電流作動が有利であることを実証するために、ナノ秒パルス放電の作動実験を行ってきた。

2. 研究の目的

超短パルス放電と物質の相互作用によりプラズマを生成および加速する方法は、前例がほとんどない全く新しい加速機構で、電熱加速、電磁加速、静電加速に次ぐ『第4の加速機構』といえる。この種の超短パルス技術は、最近の次世代型半導体露光装置の進歩とパワー半導体の著しい進化が相まって、急速に進化しつつあり、我が国独自の技術としていち早く工学的価値を実証することは非常に重要で、これが本研究の第一の目的である。この方法では、従来の電気推進では不可能な静電加速／電磁加速（高比推力／高推力）の幅広い作動モードを実現可能で、ロバスト性の極めて高い推進系を構築可能である。第二の目的は、作動試験によりこれを実証することである。

これまでの成果から、短パルス化により更なる性能向上が可能であることを確認した。本課題では更に短いパルスの超短パルス放電を高繰り返し（～1 MHz）で実現するシステムに発展させる。高繰り返し作動により、推進剤はほぼ連続的に加速される。超短パルスによるプラズマ加速は、電熱加速・静電加

速・電磁加速の何れとも異なる『第4の加速機構』ともいえる。短いパルス作動においては、電子のみに方向が揃った運動エネルギーが有効に与えられ、その後には生じる強電場による両極性拡散によりイオンが加速されると考えられる。また、通常のイオンエンジンのように空間電荷制限によるイオン電流の制限を受けない。

本研究の学術的な特色は、1)『第4の加速機構』による新しい電気推進系の開拓・創製、2)ロバスト性の極めて高いプラズマ源・推進系の実現、ならびに、3)革新的な波及効果（超短パルス放電と物質との相互作用は、航空宇宙のフィールドにおける幅広い分野に波及効果）などである。

本研究では、以下の課題について取り上げる。

- 1) シングルパルス放電による加速特性および性能評価：推進剤流量を変化させた場合（高密度モード/低密度モード）の各々のプラズマ加速特性の把握および推進性能の評価。
- 2) 高繰り返しピコ秒レーザー励起プラズマ源の開発。
- 3) パルスパワー電源の高繰り返し・高ピークパワー化。
- 4) 連続パルス放電作動時の推進性能評価。

3. 研究の方法

本研究計画における主要要素は、1)シングルパルス放電における特性評価、2)数値計算による作動条件の最適化、3)パルスパワー電源の高性能化で、既存技術で早期対応が可能な点を重視し優先的に実施することで、目標達成度の高度化を狙う。次いでこれらの要素を成熟化し統合することで、4)連続パルス放電作動実験を遂行する。これらの研究計画はさらに細分化して異なる研究機関で実施することで、各々の負荷を軽減し着実な計画遂行を図った。

3.1 シングルパルス放電実験

(1) 推進性能評価のためのシステム構築

既存の電源・性能評価装置を利用してシングルパルス放電時において、1)電極形状・サイズの影響（矩形型/同軸型）、2)推進剤の影響（固体/気体）、3)推進剤流量の影響、4)外部磁場の影響、5)パルス幅・エネルギーの影響、6)レーザーエネルギーの影響、などのそれぞれが推進性能に与える効果について定量的に比較検討し最適な作動条件の抽出を試みた。

(2) 推進性能評価および高性能化に向けた最適化

構築した電源・性能評価装置を利用してシングルパルス放電時において、1)推進剤の影響（固体/気体）、3)推進剤流量の影響、4)外部磁場の影響、5)パルス幅・エネルギーの影響、6)レーザーエネルギーの影響、などのそれぞれが推進性能に与える効果について定量的に比較評価し最適な作動条件の抽出

に取り組んだ。

3. 2 数値計算による作動条件の最適化

(1) 計算モデルの構築・試行計算

ハイブリッドPICコードを用いて、1) 推進剤の影響（固体／気体）、3) 推進剤流量の影響、4) 外部磁場の影響、5) パルス幅・エネルギーの影響、6) レーザーエネルギーの影響、などの作動パラメータを変化させた場合における支配的な物理的機構の抽出を試みた。

3. 3 パルスパワー電源の高性能化

(1) 高繰り返しピコ秒レーザー励起プラズマ源の開発・作動試験・性能評価

本計画においては、1) 種光のパルス幅、2) パルスエネルギー、3) 繰り返し周波数、4) ファイバ増幅器のゲイン、5) ファイバ増幅器の長さ、などの影響について比較検討を行い、更なる高出力化・高効率化・小型化を試みた。

(2) 高繰り返し・高ピークパワー電源の開発・構築・作動試験

新たな高繰り返し短パルス回路を導入し、推進器ヘッドを結合した状態でパルス幅 1 ns、パルスエネルギー 10 mJ（ピークパワー 0.01 GW、0.1 MHz）を実現した。

(3) 高繰り返し・高ピークパワー電源を用いた作動特性評価

推進器ヘッドを結合した状態で真空チャンバ内（0.001 Pa）でパルス幅 1 ns、パルスエネルギー 10 mJ（ピークパワー 0.01 GW、0.1 MHz）の放電作動試験を行い、放電電流および放電電圧の計測を行った。さらに、各種作動条件を変化させ作動特性を評価した。

3. 4 連続パルス放電作動実験

上記の新規に導入および開発した電源・性能評価装置を利用して高繰り返しパルス放電時において、1) 電極形状・サイズの影響（矩形型／同軸型）、2) 推進剤流量の影響、3) 外部磁場の影響、4) パルス幅・エネルギーの影響、などのそれぞれが推進性能に与える効果について定量的に比較検討し最適な作動条件の抽出に取り組んだ。

4. 研究成果

本節では、前節で述べた中から特に成果として重要な単一パルスおよび連続パルス放電作動時における性能評価について取り上げる。その他の成果は業績リストに掲載する。

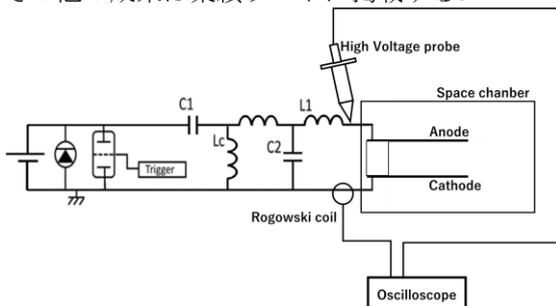


Fig.1 Schematic of experimental apparatus.

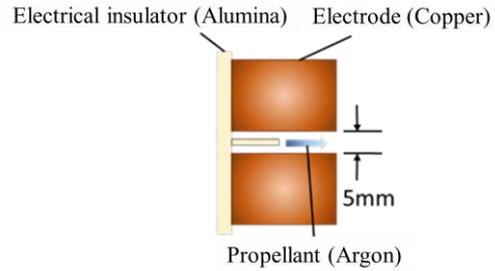


Fig.2 Schematic of thruster head.

4. 1. 単一パルスおよび連続パルス放電による作動特性評価（気体推進剤を連続供給した場合）

(1) 実験装置および方法

本研究において設計・開発したパルスパワー発生システムの放電回路および装置概略図を図1に示す。この放電回路はサイラトロンを用いたシンプルな容量移行型回路で、一次側のコンデンサの静電容量 C_1 を、二次側のコンデンサ静電容量を C_2 、寄生インダクタンスを L_1 、充電インダクタンスを L_c 、スラストヘッド（放電抵抗）を R で構成されている。回路の動作は以下の通りである。 C_1 に電圧 20 kV を印加し図中のサイラトロンを閉じると C_2 に電荷が移行する。 R のアルゴンガスが絶縁破壊電圧に達すると C_2 , L_1 , R によってパルス放電が発生する。

本研究で推進特性評価のために使用したスラストヘッドの概略図および仕様を図2および表1にそれぞれ示す。なお、推進剤にはアルゴンガスを用いた。本研究における PPT の放電電流波形はカレントモニターによって校正したロゴスキーコイルを用いて行った。充電電圧測定には高電圧プローブを用いた。

本研究では、ターゲット式スラストスタンドを製作し、力積の測定を実施した。本研究で用いるターゲット式のスラストスタンドは、推進機のサイズに関係なく微小力積の測定ができる。なお、振り子式（推進器吊り下げ式）の結果と比較して、相対的な力積の誤差が最大で 10% 程度未満であることをあらかじめ確認している。また、連続作動時の測定においては、0.1 秒間だけパルス放電を発生させ、この間に発生する力積を計測し、得られた力積が定常推力によるものと仮定して推力に換算した。

Table 1 Specification of thrust head.

Electrode length: l	15 mm
Electrode width: w	10 mm
Electrode height: h	15 mm
Discharge space	5 mm
Electrode	Cu
Propellant	Argon
Electrical insulator	Al ₂ O ₄

なお、単一パルス放電作動時のピーク電流

および電圧はそれぞれ 21 kA, 20 kV で、一方 1kHz 作動におけるピーク電流および電圧は 30 kA, 17 kV であった (いずれもパルス幅は約 100 ns). 繰り返し作動においてピーク電流が増大した原因としては、プラズマ化したアルゴンが電極間内に残留し電極間の抵抗が下がったことが考えられる。

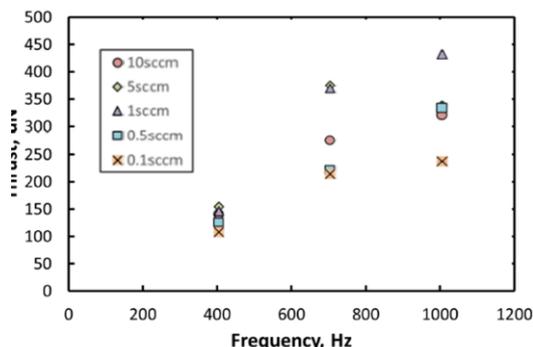


Fig.3 Thrust change with repetition frequency.

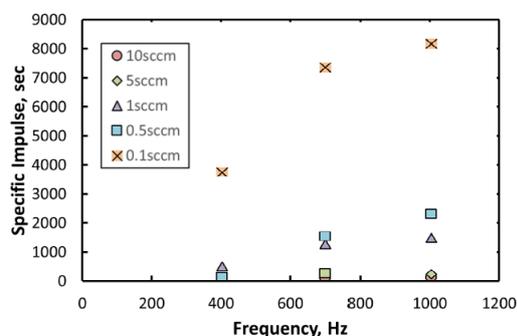


Fig.4 Specific impulse change by repetition frequency.

(2) 推進性能評価

パルス放電の繰り返し周波数によって放電波形が変化するので、これが推力へ及ぼす影響を確認するために横軸に繰り返し周波数を取り、推進剤流量ごとに比較した。図 3 に推力を示す。周波数が上がると推力も上がることがどの推進剤流量でも確認できる。また、推進剤流量 1sccm、繰り返し周波数 1 kHz のとき最大推力 450 μ N であった。図 4 に比推力のプロットを示す。図より推進剤流量 0.1~1 sccm において繰り返し周波数増加に伴い比推力が増加している。一方、推進剤流量 5, 10 sccm では繰り返し周波数変化に伴う比推力の差異があまり見られなかった。推進剤流量 0.1 sccm、繰り返し周波数 1 kHz のとき最大比推力 8200 s を得た。

4. 2. 単一パルス放電による作動特性評価 (レーザーアブレーションプラズマを推進剤として供給した場合)

(1) 実験装置および方法

図 5 に作動実験のための実験装置とパルス発生装置の概略図を示す。真空中でスラストヘッドに接続したキャパシタに充電を行う場

合、10 kV を超えるような高電圧を印可すると電極間で沿面放電が発生してしまう。従って、高電圧作動を試みる場合は、従来の受動的な放電方式 (キャパシタに予め充電を行った後にレーザーアブレーションプラズマを電極間に供給して同時に放電を誘起させる方式) では不可である。また、パルス放電のタイミングが受動的に決まるので、レーザーアブレーションプラズマの発生時間とパルス放電が必ずしも適切に適合している状況ではなかった。そこでこれらを任意に制御するために新たな短パルス放電回路を作成した。本研究では、容量移行型回路を採用し、任意のタイミングでスラストヘッドに高電圧パルスを印可できる。ただし、作動時以外も充電用のキャパシタ (以下、キャパシタバンク) には高電圧が印加されるため、こちらも沿面放電を起こす危険性が十分にある。そのため、キャパシタバンクは真空チャンバの外に設置し、スラストヘッドのみ真空チャンバ内に設置した。

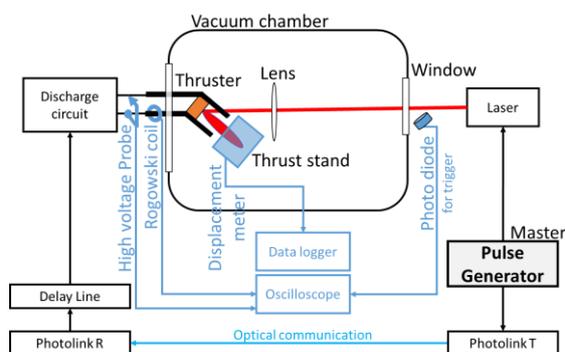


Fig.5 Schematic of experimental apparatus.

図 6 にパルス発生装置の各要素の動作順序 (各要素がやり取りするトリガ信号と各要素が発生するパルス信号) の概略図を示す。図中の時間の起点はパルス発生源 (マイコン) により発生させた信号で、これをもとにパルス発生装置の各要素は動作を開始する。パルス信号はレーザー系、放電回路系にそれぞれ 2 つ、1 つずつ送られる。放電回路系に送ったパルス信号は主放電パルスからパルス発生源を保護する目的で光ファイバケーブルを通して電氣的に絶縁し、ディレイラインによってナノ秒オーダーの時間調整を与えた後、2 系統に分離させ、放電回路のドライバと、放電回路用電源をインヒビット (出力停止信号) へ送られる。パルス発生源本体とディレイラインによってレーザーのフラッシュランプのパルス放電と Q スイッチ発振ならびにスラストヘッド電極間へのパルス電圧印加のそれぞれのタイミングを制御できるようにした。

本研究では、推進機ヘッドに 10×5 mm の矩形型電極を使用した。電極には銅を使用し、

推進剤にはアルミナを用いた。両電極はキャパシタ (TDK 製 UHV-9A) に接続した。本研究で使用したレーザは Nd:YAG レーザで、推進剤表面への照射エネルギーは 117mJ/pulse である。本実験では充電電圧 (充電エネルギー) の増加に対するインパルスビットの増減の傾向に加え、放電タイミングに対するインパルスビットの増減の傾向を取得した。

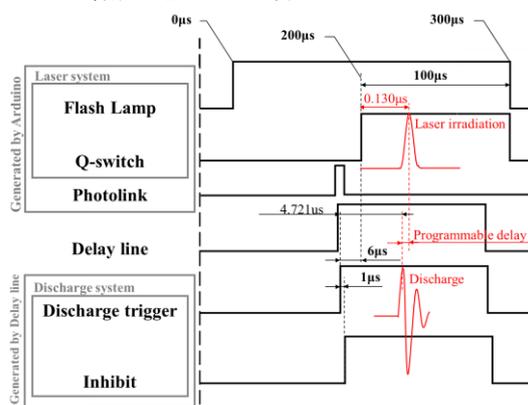


Fig.6 Schematic of pulse generation sequence.

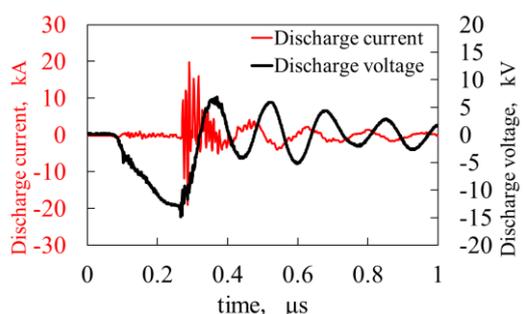


Fig.7 Waveforms of discharge current and voltage.

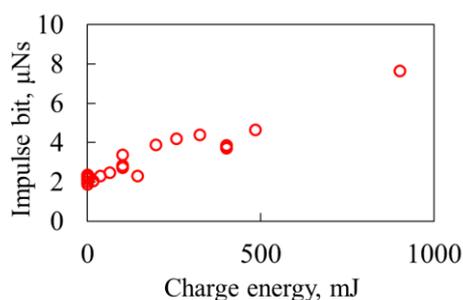


Fig.8 Measured impulse bit vs. charge energy.

(2) 推進性能評価

電流電圧波形を取得した結果 (図 7), 放電の開始は $0.271 \mu s$ で負電圧が急激に上昇を始めるタイミングで、放電周期は 160ns であった。このときの電圧から充電エネルギーを計算し、これを横軸にとり、充電エネルギーと実測した力積の関係を得た (図 8)。この図から、キャパシタの充電エネルギーを上昇させれば力積も概ね上昇しており、900mJ 時点では

$7.7 \mu Ns$ と、0mJ (レーザアブレーションのみ) に比べて $5.5 \mu Ns$ 上昇している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 11 件)

- ① K. Kato, H. Horisawa, Plasma Behavior and Magnetic Field Distribution of Short-Pulse Laser-Assisted Pulsed Plasma Thruster, Frontier of Applied Plasma Technology, Vol.10 (1), 2017, pp.11-16 (査読有) .
- ② K. Isaku, S. Fujino, R. Yamashita, K. Takiuchi, K. Tei, S. Yamaguchi, Numerical and experimental analysis of spectral broadening in picosecond multi-stage fiber amplifier, Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, 2017 Conference (査読有) .
- ③ S. Fujino, K. Isaku, K. Amamoto, R. Nagai, K. Satou, K. Tei, S. Yamaguchi, J. Enokidani, Development of ultrashort pulse fiber CPA system, Proc. CLEO pacific Rim 2017, 2017 (査読有) .
- ④ H. Hasegawa, Y. Nakamura, H. Horisawa, Discharge Characteristics of a Gas-fed Short-pulse Plasma Thruster, Proc. MJJIC2016, Paper-ID: 15703049452016, 2016 (査読有) .
- ⑤ H. Kato, Y. Nakamura, H. Horisawa, Acceleration Characteristics of Laser Ablation Plasmas by Alternating Electric Fields, Proc. MJJIC2016, Paper-ID: 1570304922, 2016 (査読有) .
- ⑥ K. Kato, H. Horisawa, Effect of Thruster Lengths on Magnetic Field Distributions of Short-Pulse Laser-Assisted Pulse Plasma Thrusters, Proc. MJJIC2016, Paper-ID: 1570304944, 2016 (査読有) .
- ⑦ R. Yamashita, K. Maeda, G. Watanabe, K. Tei, S. Yamaguchi, J. Enokidani, S. Sumida, Tunable pulse width and multi-megawatt peak-power pulses from a nonlinearly compressed monolithic fiber MOPA system, SPIE Proc. Vol.9728, p.95, 2016 (査読有) .
- ⑧ 堀澤秀之, 宇宙用レーザー推進機, レーザー研究, Vol.43(9), 2015, pp.606-610 (査読有) .
- ⑨ 明石直, 大井川佑治, 細川大志, 堀澤秀之, レーザー電気複合推進機の短パルス作動特性, レーザー研究, Vol.43(9), 2015, pp.633-637 (査読有) .
- ⑩ Y. Nakamura, H. Hosokawa, H. Horisawa, High Repetition Rate Operation of a Low-power Short-pulse Plasma Thruster, Proc. MJJIC2015, Paper-ID:1570231893, 2015 (査読有) .
- ⑪ A. Osamura, R. Edamura, H. Horisawa, Development of an Alternating Electric Field Accelerator for Laser-ablation Plasma Acceleration, Proc. MJJIC2015, Paper-ID: 1570231898, 2015 (査読有) .

〔学会発表〕(計 44 件)

- ① H. Kamezaki, K. Matsubara, K. Kato, Y. Oigawa, H. Horisawa, Short-Pulse Operation of a Laser-Assisted Pulsed Plasma Thruster, 31st ISTS, ISTS2017-b-73, 2017.
- ② Y. Murayama, T. Ohi, K. Kato, H. Kato, N. Akashi, H. Horisawa, Magnetic Field Measurement of Laser-Electromagnetic Hybrid Thrusters, 31st ISTS, ISTS2017-b-77, 2017.
- ③ H. Kato, Y. Nakamura, K. Yano, H. Horisawa, Acceleration of Laser-Ablation Plasma by Alternating Electric Fields, 31st ISTS, ISTS2017-b-55, 2017.
- ④ K. Yano, H. Kato, Y. Nakamura, A. Osamura, R. Edamura, H. Horisawa, Laser-ablation Plasma Diagnostics by Single- and Triple-probes, 31st ISTS, ISTS2017-b-57, 2017.
- ⑤ K. Kato, T. Oi, H. Horisawa, Plasma Characterization of a Short-pulse Laser-assisted Pulsed Plasma Thruster, 31st ISTS, ISTS2017-b-47, 2017.
- ⑥ H. Kato, Y. Nakamura, K. Yano, H. Horisawa, Characterization of a Laser-Electrostatic Hybrid Thruster by Alternating Electric Fields, 35th International Electric Propulsion Conference, 2017.
- ⑦ 堀澤, 加藤, 加藤, 武中, 柴垣, 矢野, 大井, レーザーを援用した小型プラズマ推進機, 第 61 回宇宙科学技術連合講演会, 2017.
- ⑧ 加藤, 矢野, 亀崎, 堀澤, 矩形型レーザーアシストパルスプラズマ推進機の短パルス作動, 第 61 回宇宙科学技術連合講演会, 2017.
- ⑨ 加藤, 大井, 堀澤, 矩形型レーザーアシストパルスプラズマ推進機の短パルス作動と加速チャネル長の影響, 第 61 回宇宙科学技術連合講演会, 2017.
- ⑩ 大井, 加藤, 佐藤, 松原, 堀澤, 短パルスレーザーアシストPPTにおけるレーザーエネルギーが推進性能に及ぼす影響, 第 61 回宇宙科学技術連合講演会, 2017.
- ⑪ 加藤, 矢野, 亀崎, 堀澤, 高電圧短パルスレーザーアシストパルスプラズマ推進機の放電パルス制御, 平成 29 年度 宇宙輸送シンポジウム, 2017.
- ⑫ 加藤, 大井, 堀澤, 矩形型レーザー・電磁加速複合推進機の加速特性, 平成 29 年度 宇宙輸送シンポジウム, 2017.
- ⑬ 佐藤, 大井, 堀澤, 加藤, 短パルスレーザーアシストPPTのレーザーエネルギーが推進性能に及ぼす影響, 平成 29 年度 宇宙輸送シンポジウム, 2017.
- ⑭ 増田, 伊作, 山口, 鄭, ピコ秒ファイバ

ーMOPA システムのピーク出力限界, レーザー学会学術講演会第 38 回年次大会, 2017.

- ⑮ 伊作, 増田, 藤野, 鄭, 山口, ハイブリッド・ピコ秒 MOPA システムに用いるファイバーシード光源の開発, レーザー学会学術講演会第 37 回年次大会, 2016.
- ⑯ 藤野, 伊作, 加藤, 鄭, 山口, 超短パルスファイバーCPA システムの開発, レーザー学会学術講演会第 37 回年次大会, 2016.
- ⑰ H. Horisawa, High-power lasers versus low-power LEDs for space propulsion applications, International High Power Laser Ablation Directed Energy, 2016.
- ⑱ K. Matsubara, H. Hosokawa, Y. Oigawa, H. Horisawa, High-specific impulse characteristics of a short-pulse laser-assisted pulsed plasma thruster, International High Power Laser Ablation Directed Energy, 2016.
- ⑲ 加藤, 納村, 枝村, 土屋, 加藤, 堀澤, スイッチング電場によるレーザーアブレーションプラズマの加速, 日本航空宇宙学会第 47 期定時社員総会/年会講演会, 2016.
- ⑳ 加藤, 加藤, 明石, 堀澤, 短パルスレーザーアシスト・パルスプラズマ推進器の加速機構の検討, 日本航空宇宙学会第 47 期定時社員総会/年会講演会, 2016.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堀澤 秀之 (Horisawa, Hideyuki)
東海大学・工学部・教授
研究者番号: 30256169

(2) 研究分担者

橘 武史 (Tachibana, Takeshi)
九州工業大学・工学系研究院・教授
研究者番号: 50179719

船木 一幸 (Finaki, Ikkoh)
独立行政法人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

鄭 和翊 (Tei, Kazuyoku)
東海大学・理学部・准教授
研究者番号: 70399335

山口 滋 (Yamaguchi, Shigeru)
東海大学・理学部・教授
研究者番号: 40297205