

令和 6 年 4 月 7 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K03895

研究課題名（和文）カオス理論を応用したプラズマの安定化に関する研究

研究課題名（英文）Study on stabilization of plasma using chaos theory

研究代表者

福山 隆雄（Fukuyama, Takao）

長崎大学・教育学部・准教授

研究者番号：20403800

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：計画に沿って、プラズマの安定化を目的として研究に取り組んだ結果、1.カオス状態の電離波動に、外力やフィードバックを印加することで振動が周期化すること、2.フィードバックを印加されている系は、より小さな外力によって振動が周期化すること、3.汎用的な時間遅れフィードバック法（ピラガス法）を用いて、系の同期現象によって振動が周期化すること、4.火花放電の合体によって放電の光の変動が安定化すること、5.2つのプラズマジェットが相互作用することによって、プラズマジェットの明滅のリズムが同期すること、という研究成果を得ることができた。研究成果は、6本の査読付き英語論文、14件の学会発表等に結実した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

プラズマ中の電離波動やプラズマジェットを、カオス実験の非線形媒質として研究を遂行することによって、カオス制御や同期現象、散逸構造の形成にかかわる法則などの、非線形科学に関する新しい知見を生み出したという点において、学術的意義がある。

また、電離波動は真空容器内、プラズマジェットは大気圧において、シンプルに発生できるプラズマであり、まずは、シンプルなプラズマの安定化についての研究を通して知見を蓄積することで、将来的に広範なプラズマへの適用を試みる、という立ち位置で研究が遂行され、核融合プラズマやプロセスプラズマなど、多様なプラズマの制御法の基盤構築への貢献につながるという面で社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：As a result of our research for the purpose of plasma stabilization, we found that 1.the oscillations of ionized waves in a chaotic state can be periodized by applying an external force or feedback, 2.the system to which feedback is applied can be periodized by a smaller external force, 3.the oscillations can be periodized by synchronization phenomena of the system using a general-purpose time-delayed feedback method (Pyragas method), 4.the light fluctuations of the discharge can be stabilized by the coalescence of spark discharges, 5.the rhythm of the flickering of the plasma jet is synchronized by the interaction of two plasma jets. The research results were presented in 6 peer-reviewed papers in English and 14 conference presentations.

研究分野：プラズマ物理学

キーワード：プラズマ カオス制御 同期現象 電離波動 プラズマジェット

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

研究背景は下記に示すように、(1) プラズマ中の電離波動に関するもの、および、(2) 大気圧プラズマジェットに関するもの、に大別できる。

- (1) グロー放電下の陽光柱内において、空間を伝わる電離（プラズマ化）の波面の動きのことを電離波動と呼ぶ。電離波動はプラズマ光の変動を伴っており、ラインスキャンカメラなどの光学的検出デバイスを用いた非接触測定が可能である。電離波動中では、カオスを含む多彩な非線形振動が光の暗明の縞模様として観測されるが、その波面の動きが織りなすプラズマの構造形成に関しては、これまでに不明な点が多く残っている。申請者らは、2つの放電管を結合させて、電離波動の位相が同期することを見出してきているが、その詳しい機序については未解明である。近年では、電離波動をひとつの非線形振動子と捉えて2つの振動子の相互作用（結合振動子系）についての研究が注目されてきている。これまでに、電離波動の結合振動系において、時間・空間に渡った同期が生じることなどが明らかにされている。しかしながら、この電離波動の同期が起こる条件や、そのメカニズムは明らかにされていない。
- (2) 大気圧プラズマジェットは、電離の波面が空間を繰り返し高速で伝搬することによって生成・維持されることが知られているが、時間・空間的にどのような構造が形成されるのか、不明な点が多く残っている。申請者はこれまでの実験を通して、大気圧プラズマジェットにおける電離波面の伝搬を、光学的に検出できることを見出してきており、プラズマジェットを用いた同期現象という視点から研究に取り組む。大気圧プラズマジェットについて、近年では細胞へ照射して医療に応用する技術など、多様な場面へ広がりを見せている。ここで、従来の大気圧プラズマジェットは不安定に揺れ動くため、小さな領域に長時間照射するような利用のためには、プラズマジェットの安定化が望まれる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、グロー放電下の陽光柱における電離波動の同期現象、および、大気圧プラズマジェット中の電離波面の伝播にともなう構造形成についての機序を解明し、同期現象の知見をプラズマジェットに応用することで、プラズマの安定化の手法を提案することである。

グロー放電下の陽光柱における電離波動の同期現象に関する研究では、2つの放電管を電氣的に直接結合させ、電離波動の結合振動子の実験系を構築し、どのような条件で2つの放電管中の電離波動の位相が同期するのか、さらに、どのような過渡状態を経て位相同期に至るのかを解明することを目的とする。

大気圧プラズマジェットの電離波面の伝播に関する研究では、電離波面の移動の時間・空間に渡った観測を通して、伝搬の様子や、どのような時空構造が形成されるのか解明する。さらに、位相同期が生じると系は時間的・空間的に安定化するという特徴に着目して、同期現象を活用したプラズマジェットの安定化を考案することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究は、電離波動における時間・空間構造の測定および同期現象というカオス研究から得られた知見を、大気圧プラズマジェットの安定化に活かす、という独自の視点に基づいた方法のもと遂行される。本研究の方法は、下記のように、(1) 電離波動に関するもの、および、(2) プラズマジェットに関するもの、に大別できる。

- (1) グロー放電下の陽光柱における電離波動を対象として、2つの電離波動が相互作用するとき、どのような放電電流や結合強度において位相同期現象が達成されるのか、さらに、どのような過渡状態を経て位相同期現象が達成されるのか、実験を通して明らかにするとともに、得られた知見を下記(2)の研究に応用する。
- (2) アルゴンガスを使用したプラズマジェットを発生させ、ラインスキャンカメラを用いて時間・空間に渡った様子を観測し、電離の波面が伝わる際の力学的挙動を明らかにする。続いて、プラズマジェットが相互作用する系を構築する。2つのプラズマジェットを相互作用させ、その結合振動子系について時間・空間に渡って測定し、同期が生じる条件を明らかにする。それから、最大リアプノフ指数を用いて、同期現象を活用したプラズマジェットの安定化について評価を行う。

4. 研究成果

研究計画に沿って、プラズマの安定化を目的として研究に取り組んだ結果、以下に記すように (1)カオス状態の電離波動に、外力やフィードバックを印加することで振動が周期化すること、(2)フィードバックを印加されている系は、より小さな外力によって振動が周期化すること、(3)汎用的な時間遅れフィードバック法（ピラガス法）を用いて、系の同期現象によって振動が周期化すること、(4)火花放電の合体によって放電の光の変動が安定化すること、(5)2つのプラズマジェットが相互作用することによって、プラズマジェットの明滅のリズムが同期すること、という以上の研究成果を得ることができた。以下、概要と内容を表す典型的な結果の図を示す。

- (1) グロー放電プラズマにおける電離波動の力学的挙動、特に周期化について調べた。一連の実験では、放電管を高真空に排気した後、2つの電極間でグロー放電を行い、ネオンプラズマを生成した。光強度の揺らぎをラインスキャンカメラとフォトダイオードで時空間信号としてサンプリングし、データを解析した。最大リアプノフ指数を実験サンプルの時系列から計算し、システムの複雑さを定量化した。カオス状態に加える外力の強さを徐々に増加させると、信号対雑音比（SNR）は飽和した。これは、電離波動のカオス振動が外力と同期しているためである。カオス系の周期的な軌道が強調され、SNRが最大値に達すると振動はコヒーレントになった。周期性が強調されると、振動は時間的だけでなく空間的にもコヒーレントになった。図1は、最大リアプノフ指数の、(a)外力、(b)フィードバック強度、に対する変化を示す。

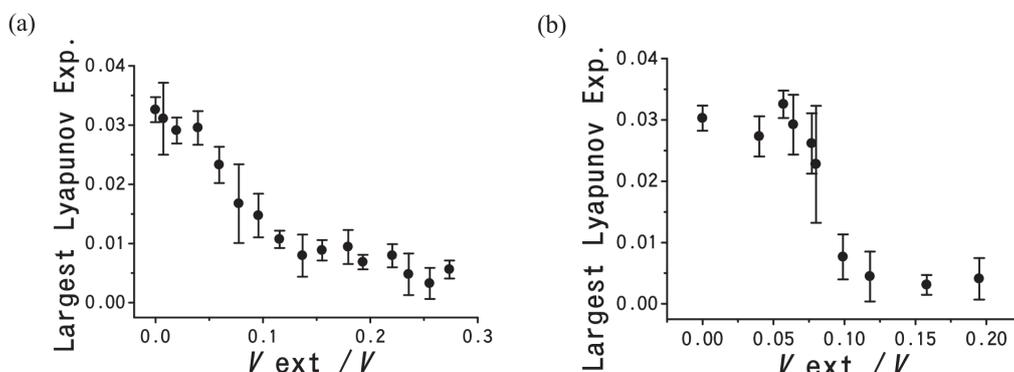


図1：最大リアプノフ指数の、(a)外力、(b)フィードバック強度、に対する変化。

- (2) プラズマのカオス制御に関する知見を得ることを目的として、フィードバック・ループ回路の影響を受ける実験室プラズマの外力に対する影響を実験的に調べた。実験室プラズマ中の電離波動を典型的な非線形系の媒質として研究した。フィードバックの影響を受けない系（系Aと定義）の場合、印加される外力の強度が増加するにつれて、カオス系の軌道は周期的な状態に変化した。フィードバックの影響がある系（系Bと定義）の場合、系Aに比べ低い強度（約3分の2）の外力を加えることで、カオス系の軌道は周期的なものに変化した。このことから、フィードバック・ループ回路が外力に対する系の応答を向上させることが明らかになった。図2は、印加外力の強度に対するSN比と最大リアプノフ指数を示す。

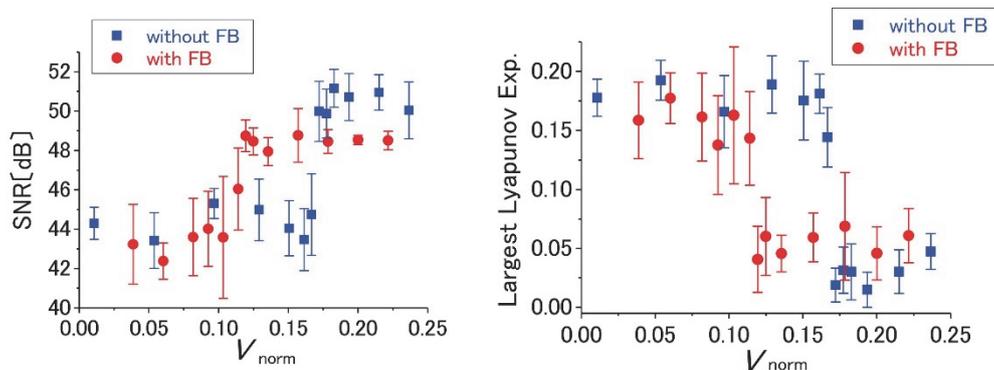


図2：印加外力の強度に対するSN比（左図）と最大リアプノフ指数（右図）。フィードバックを有する系（グラフ中の●プロット）の方が、有しない系（グラフ中の■プロット）と比べて、より小さな外力強度で周期化する（SN比が上昇、最大リアプノフ指数が0に漸近）ことが分かる。

- (3) LabVIEW システムを用いて、時間遅れフィードバック法に基づくカオス制御システムを構築した。制御パラメータとして、適切な遅れ時間と増幅率を設定すると、カオス振動は周期的な状態に安定化した。しかし、そうでない場合、系はよりカオス的な状態に遷移した。構築されたカオス制御システムについて、系を支配するプラズマ回路中の部分にフィードバック信号を施すことにより、実験室プラズマに広く適用することができると考えられる。図3は、時間遅れフィードバック法を用いて周期振動へ制御される過程を示す。

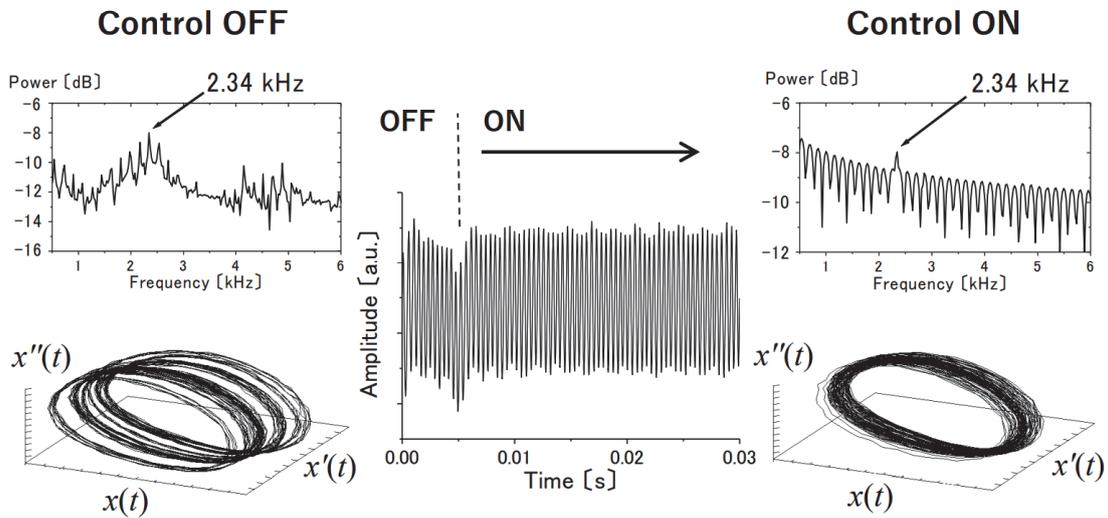


図3：プラズマ中の電離波動において観測されるカオス的な振動が、時間遅れフィードバック法を用いて周期振動へ制御される過程。電離波動からの発光強度の時間変化が、時系列データとして測定される。時系列、パワースペクトル、位相空間における再構成軌道より、カオス状態 (control off) が周期状態 (control on) へ制御されることが分かる。

- (4) カオス振動を示す大気圧アルゴン火花放電の安定化について実験的に研究した。2つの火花放電を準備して、それらを合体させた。合体前と合体中の大気圧火花放電系について、写真、時系列、パワースペクトル、最大リアプノフ指数に基づいて調べた。これらの実験を通して、合体後の放電系はコヒーレントな周期的振動を示し、力学的挙動がカオス的なものから秩序的なものへ変化することを発見した。図4は、合体前後の火花放電の写真を示す。

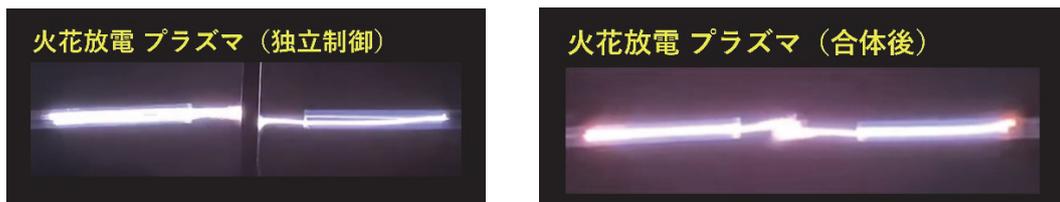


図4：合体前後の火花放電の様子の写真。

- (5) 大気圧 He プラズマジェットからの発光リズムを実験的に調べた。プラズマから放射される電磁波の時系列を高速度カメラによる動画と併せて解析した結果、プラズマから放射される電磁波の基本周波数に対応する発光の明滅を繰り返していることが分かった。さらに、2つのプラズマジェットが相互作用をすると、両方のプラズマジェットが明るく発光する割合が著しく増加することが分かった。図5は、プラズマジェットの相互作用の様子を示す。

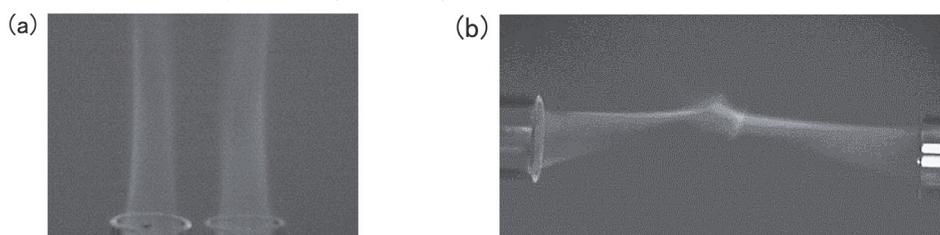


図5：プラズマジェットが相互作用する様子。(a)鉛直配置，(b)水平配置。

<引用文献>

- ① T. Fukuyama, R. Yamaguchi, H. Kanzaki, *Plasma Fusion Res.* **15**, 2401049 2020 年
Emphasis of Periodicity in the Dynamic Behavior of Ionization Waves
- ② T. Fukuyama, M. Omoto, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2021(7)**, 073J01, 2021 年
Response of laboratory plasma influenced by a feedback loop to external force
- ③ T. Fukuyama, N. Nishida, *Plasma Fusion Res.* **17**, 1201002, 2022 年
Development and construction of a general-purpose system to control chaos in a laboratory plasma
- ④ T. Fukuyama, K. Miyazaki, *J. Phys. Soc. Jpn.* **89**, 105001, 2020 年
Periodicity due to Coalescence of Atmospheric Pressure Discharge
- ⑤ T. Fukuyama, T. Yamaguchi, H. Ogawa, *J. Phys. Soc. Jpn.* **91**, 085001, 2022 年
Emission Rhythm from Atmospheric Pressure He Plasma Jets

<備考>

本課題（20K03895）の「最終年度前年度応募」により、新課題（23K03355：プラズマ中の同期現象の究明とカオス制御への応用）に採択されたため、本研究を再構築して発展させるために、当初の計画より1年間短縮した。よって2023年度は、新課題による研究期間に入るが、本課題と新課題の両方に跨る研究成果として、下記の査読付き国際論文を発表してきている。

T. Fukuyama, Y. Sueyoshi, *Plasma Fusion Res.* **18**, 1401088, 2023 年
Observation of Intermittent Chaos Caused by Delayed Feedback in a Laboratory Plasma

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 FUKUYAMA Takao, SUEYOSHI Yutaro	4. 巻 18
2. 論文標題 Observation of Intermittent Chaos Caused by Delayed Feedback in a Laboratory Plasma	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1401088-1~7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1585/pfr.18.1401088	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 -
1. 著者名 FUKUYAMA Takao, YAMAGUCHI Takechika, OGAWA Haruka	4. 巻 91
2. 論文標題 Emission Rhythm from Atmospheric Pressure He Plasma Jets	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 085001-1~2
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.91.085001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 FUKUYAMA Takao, OMOTO Masahiro	4. 巻 2021
2. 論文標題 Response of laboratory plasma influenced by a feedback loop to external force	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 073J01-1~7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/ptab076	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 -
1. 著者名 FUKUYAMA Takao, NISHIDA Naoki	4. 巻 17
2. 論文標題 Development and Construction of a General-Purpose System to Control Chaos in a Laboratory Plasma	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1201002-1~2
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1585/pfr.17.1201002	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 -

1. 著者名 FUKUYAMA Takao, YAMAGUCHI Rina, KANZAKI Hiroki	4. 巻 15
2. 論文標題 Emphasis of Periodicity in the Dynamic Behavior of Ionization Waves	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2401049-1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.15.2401049	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 -

1. 著者名 FUKUYAMA Takao, MIYAZAKI Keisuke	4. 巻 89
2. 論文標題 Periodicity due to Coalescence of Atmospheric Pressure Discharge	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 105001-1~2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.105001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 福山 隆雄, 末吉 悠太郎, 西田 直輝
2. 発表標題 時間遅れフィードバックによる電離波動中のカオス制御
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福山 隆雄
2. 発表標題 プラズマ中のカオス的挙動の制御に関する研究
3. 学会等名 令和4年度NIFS共同研究研究会「核融合プラズマの運転制御に関するシミュレーション研究の進展」(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福山 隆雄, 松瀬 光希, 小川 晴香
2. 発表標題 大気圧プラズマの相互作用に関する研究 (結合と合体はどのように異なるのか?)
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 福山 隆雄, 山口 雄史, 小川 晴香
2. 発表標題 大気圧プラズマジェットの発光同期現象の観測
3. 学会等名 日本物理学会 2021年 秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福山 隆雄, 大本 将弘, 西田 直輝
2. 発表標題 フィードバックを有する電離波動の外力に対する非線形応答
3. 学会等名 第38回 プラズマ・核融合学会 年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takao FUKUYAMA
2. 発表標題 Operating principle of fundamental circuit to produce high-voltage for development of beam acceleration
3. 学会等名 International Symposium on Vacuum Science and Technology and its Applications in Accelerators (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福山 隆雄, 小川 晴香, 山口 雄史
2. 発表標題 プラズマジェットの内減リズムの同期と時系列解析
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福山 隆雄, 宮崎 啓介, 山口 雄史
2. 発表標題 2つの大気圧プラズマの相互作用が織りなす力学的挙動
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福山 隆雄, 山口 莉奈, 宮崎 啓介
2. 発表標題 プラズマ中で観測されるカオス軌道の周期化に関する研究
3. 学会等名 第37回 プラズマ・核融合学会 年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福山 隆雄, 大本 将弘
2. 発表標題 プラズマ中におけるカオスの外力・フィードバックに対する応答に関する実験
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福山 隆雄, 末吉 悠太郎, 野口 滉二郎
2. 発表標題 時間遅れフィードバックに起因する間欠的カオスの観測
3. 学会等名 日本物理学会 第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 福山 隆雄, 松瀬 光希
2. 発表標題 明滅リズムに着目したプラズマジェット間の相互作用に関する研究
3. 学会等名 第40回 プラズマ・核融合学会 年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 福山 隆雄, 野口 滉二郎
2. 発表標題 プラズマ中における脱・位相同期から生じる間欠的な遷移現象
3. 学会等名 日本物理学会 2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 福山 隆雄
2. 発表標題 小型プラズマ装置（電離波動・プラズマジェット）を用いた非線形実験
3. 学会等名 プラズマ・カオス研究会 / 液晶乱流研究会
4. 発表年 2024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
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------