

令和 6 年 10 月 5 日現在

機関番号：24201

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K18704

研究課題名（和文）プラズマチャンネルで実現する物流ルート探索のエンジン機能

研究課題名（英文）Core functions of logistics route finder achieved in plasma-channel experiments

研究代表者

酒井 道（Osamu, Sakai）

滋賀県立大学・工学部・教授

研究者番号：30362445

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：多地点間の物流ルート網と、電極が多数存在する場合に生じる多数の長尺プラズマチャンネル形成との間の情報フローの類似性に着目し、経路探索解を求めるアナログコンピューティング機能をマルチ長尺プラズマのパターン形成により実現した。プラズマチャンネルによる迷路解法の系から電極対を増加させ、発光パターンからの多数チャンネル形成の高速動画像を得た。また、強化学習系の経路探索（格子状ネットワークにおける多地点分布形状）の結果と対照させ、計算機単独による演算と比べて高速の経路探索解法を開発した。すなわち、「NP困難」である経路探索問題への活用を例として、プラズマが持ちうるアナログコンピューティング機能を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、これまでプラズマが特定の機能（この場合、経路探索能力）について、決して完全なものではないものの、従来の計算機に比べて桁違いに高速であることを示すことができた。また、その機構のモデル化において、強化学習法における行動価値関数の計算式とプラズマ中の粒子輸送の方程式との間の共通性を新たに見出した。プラズマ生成の形態としても、誘電体バリア放電を用いることで、安定して多電極間の複雑プラズマ形状を実現できることを示した。これらの成果は、これまでにプラズマ理工学の枠内で得られていた知見を超えて、新たなアナログコンピューティングツールとして評価に値することを実証した。

研究成果の概要（英文）：Logistic routing and long-channel plasma generation shares configurational common points, and rapid plasma ignition and its suggestions successfully shortened route findings in a function of analog computing. Based on the maze-solving function of plasma and increasing number of electrodes pair, plasma emission patterns form very rapidly in comparison with numerical computation of route design. Such results were successfully analyzed in comparison with reinforcement-learning models. These facts indicate that plasma possesses some kinds of analog computing capability, which works remarkably for a problem of NP (Non-deterministic Polynomial-time) hardness.

研究分野：プラズマ理工学

キーワード：プラズマ 物流ルート探索 強化学習 アナログコンピューティング

## 1. 研究開始当初の背景

プラズマの中に膨大な数で存在する粒子とその間の相互関係性を考えれば、そのネットワーク構造は、個々のプラズマ粒子(あるいは細部)が持つ応答の非線形性により成り立ち、巨大かつ複雑な帰還ループ系を多く含んでいる。そして、そのような系はリザーバコンピューティング素子として動作可能という指摘がある[1]。すなわち、プラズマはコンピュータ機能を部分的に備えうる、という「知能性」を所持しているという見方が可能である。しかし、原理的にそのような可能性が指摘できたとしても、具体的にどのような知能性なのか(例えばノイマン型/非ノイマン型コンピュータといった分類)・実際にどのようにその知能性を用いることができるか、についての実証はなかなかなされてこなかった。本研究の研究代表者は、これまで様々な学術上・産業応用上のプラズマ理工学検討を行ってきたが、プラズマの示す複雑系としての多様性と非線形性の研究を行う中で、その両者より成り立ちうる知能性(人間にとって自律的と感じる自己制御性)に着目し、これらの学術的問いに対する回答を試みてきた。

研究代表者は、これまでにプラズマによる迷路探索が可能であることを示し[2]、知能性の一端は実証できたともいえるが、それを社会応用して役立てるといレベルと比較すると大いに乖離がある。この検討と並行して、研究代表者は複雑ネットワーク科学に立脚した物流ルート探索問題に取り組み始め、地産地消物流設計として社会実装の一手手前まで来た[3]。ここで、物流のルート探索問題を解く場合、通常のコンピュータでは解導出に時間がかかる。そこで、プラズマによる迷路探索機能を、物流ルート探索を含んだ一般の経路探索法の確立に活用できないか、という着想に至った。

以上について、これまでの関連研究の知見も合わせてもう少し整理すると、本研究の背景と着眼点は、以下のようにまとめられる。

### (1) プラズマの持つ「知能性」の活用

プラズマの振舞いを機械学習系的手法で解析しようという試みは、ここ数年で増えているが、そこではプラズマ内部をブラックボックス的に扱ってしまっている。それに対して、本研究では、プラズマの内部機構を理解しつつアナログコンピューティング素子として活用する、というものである。この突飛な提案は、恐らく評価が難しいだろうが、研究代表者は次に述べるような3つの仮説を立てた。

(A) プラズマの実体はリザーバコンピューティング機能と等価(前述の通り)

(B) プラズマ中のデータとしての情報は、粒子が個別に持つ量(パラメータや励起レベルなど)というより、要素間の関係性という流れの中に担持されていると推定

(C) それを活用するのが困難な理由は、プラズマ側とそれを利用する側で情報の取り出しに対するインタフェースの不確立状態にあるため

これらの観点を踏まえて解決を図ることで、プラズマの知能性の応用展開が数多く広がると期待される。

### (2) 上位レイヤーとしてのアナログコンピューティング性

アナログコンピューティング機能[4]としては、風の流れを風洞実験で模擬するもの等が歴史的に実績はあるが、その場合は物理的実体そのものをシミュレータとして用いている。一方で、本研究は、本来は過渡的・定常的な電離状態であるプラズマにより、全く異なる機能(例えば、迷路解法)を指向する試みである。近年盛んな、アナログコンピューティング用のハードウェアとしての提案の多くは、ノイマン型コンピュータの素子やソフトウェア動作の置き換えに關してであり、本提案のような計算アルゴリズムそのものの異なる実体による物理模擬という、いわゆる上位レイヤーとしての置き換えについては、これまでは主流の研究としては捉えられてこなかった。実験における長尺プラズマチャネルの形成(プラズマによる電荷の輸送)も、パーティクル計算における迷路(その構造内における仮想エージェントによる経路探索)も、例えば格子点が5×5の格子状ネットワークでモデル化することが可能であり、両者とも現象は情報フローである。このように、形状を共通化した上で、両者間で同じ/異なる要素・機能は何か、という観点で検討を進める。すると、プラズマ理工学の観点では、多電極対間でのプラズマ生成実験となり、物流ルート探索の観点では「NP困難(Non-deterministic polynomial-time hardness)[5]である探索解法となる。最終的に、観測するプラズマ形成機構をルート探索解法の全体あるいは一部に置換することを通して、高速かつ自動の解法を開発する。

### (3) プラズマ経路の構造分離と電気接続維持(ネットワーク科学による橋渡し)

プラズマ理工学の研究において、マルチ電極構造におけるマルチチャネルの形成に活路を見出す検討は、これまで少なかった[6]。それは、放電形態において、カソード電極からアノード電極へ至る、シースや陽光柱を含む電位構造は、プラズマ生成において不変であるためである。これに対して、誘電体バリア放電の工学的進展において、放電電流が流れ込む電極部位が時間的に変化することが示唆された[7]。本研究では、その概念を押し進め、電氣的接続としては連続し

ているものの電極構造形態としては分離した構造で、マルチ電極としての動作確認と蓄積電荷の調整機能（誘電体バリア放電の均一化と対しては実証済み）を確認する。そして、マルチチャンネル状態をネットワーク科学と接続し、プラズマに内在する情報輸送機能（粒子輸送だけでなく、電気信号伝送を含め）を明確にする。

## 2. 研究の目的

本研究では、多地点間の経路探索法と、電極が多数存在する場合に生じる多数の長尺プラズマチャンネル形成との間の情報フローの類似性に着目し、経路探索解を求めるアナログコンピューティング機能をマルチ長尺プラズマのパターン形成により実現する。開発済みのプラズマチャンネルによる迷路解法において電極対を増加させ、発光パターンからの多チャンネル形成の高速動画像を得る。また、強化学習系の計算機自動演算によるルート探索（格子状ネットワークにおける入口/出口の多地点分布形状）の結果と対照させて、両者の間に情報フローの類似性を見出す。そして、その類似部分について、プラズマ形成の様子を、ルート解法の全体あるいは一部に置き換えることで、計算機演算と比べて桁違いの高速解法を開発する。すなわち、「NP 困難」であるルート探索問題への活用を例として、プラズマが持ちうるアナログコンピューティング機能を評価する。

## 3. 研究の方法

以下、本項「3. 研究の方法」および次項「4. 研究結果」について、下記の項目(a)-(c)に対して記述する。

### (a) プラズマチャンネルによる実験的迷路解法における電極対の多数化と、プラズマチャンネル形成の観測

電極の数を増やして、正負極性の電極数を増やし、かつ誘電体被覆された状態でプラズマ生成を行う。誘電体バリア放電形態[7]とすることで、放電電流が流れて誘電体層への電荷蓄積が発生すれば（=配送が完了すれば）電流が停止する機構とする。つまり、放電電流の性質（直流放電で電流値を制限するためにバラスト抵抗を用いる原理）から、複数の電極対の間でのプラズマチャンネル形成は同時ではなく、電流形成と電荷蓄積が順に生じ、系全体が安定化すると予想される。また、プラズマチャンネル形成の観測（電荷の過不足が他の電極との間の放電でならされ、マルチ電極系全体でのプラズマチャンネル形成が完了すると想定）を行う。各電極の電荷蓄積量は、各々の2次元誘電体層との間の距離で調整可能とする。正負の電極は各々でまとめ、一つのkHz帯高周波電源（既設）により駆動する。

### (b) 強化学習系の最短物流ルート探索計算におけるエージェントの多数化

エージェントの多数化に伴うマルチエージェントシミュレーション結果の変化の観測を行う。内容(a)では原則的には複数プラズマチャンネルの同時形成を想定しなかったが、実際には残存電荷・励起粒子より、ある程度の履歴現象・クロストークの発生が予想される。そこで、エージェント数を多数とし、最短ルート探索計算を実施して、内容(a)と比較する。

### (c) プラズマチャンネル発光の高速動画観測とルート自動探索計算への組み込み

プラズマチャンネルの形成実験からの有用なデータ抽出を行い、そのデータの活用によるルート探索を行う。これは、計算の高速化への応用といえる。内容(a)と(b)の両者で、外部条件や内部機構をある程度共通化できても、双方が物理現象として異なる以上、相違点は残る。すなわち、プラズマに経路探索問題を完全に解かせるアナログコンピューティング手法を開発するのは困難であり、部分的かつ具体的な想定として、プラズマチャンネル形成により生じるチャンネルの発光強度を計算過程の活用することを考える。また、繰り返しではなく単発の現象として、プラズマ生成開始からの高速度カメラによる発光パターン（チャンネル間の発光遷移）の過渡変化を観測することで、計算の高速化がどの程度可能かについて実験実証する。

## 4. 研究成果

(a) プラズマチャンネルによる実験的迷路解法における電極対の多数化と、プラズマチャンネル形

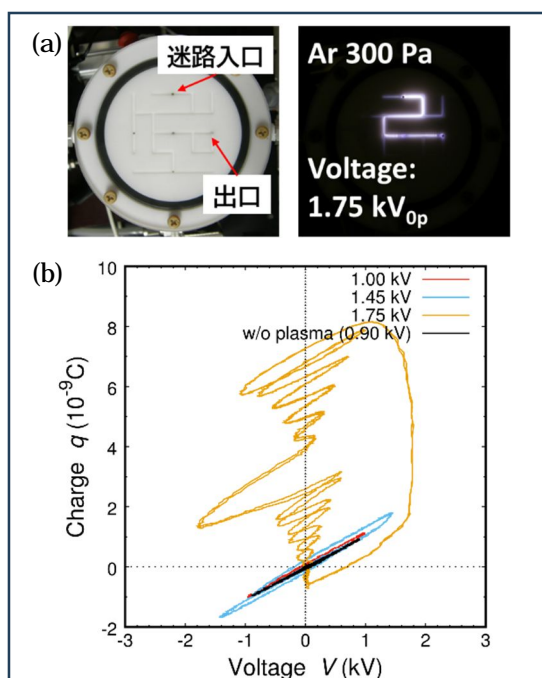


図1 (a)迷路解法を提供するプラズマチャンネルの生成系と可視発光。(b)検出電流信号より求めたりサージュ図形（電荷・電圧特性）。いずれも、参考文献[8]より (by The Author(s) licensed under CC BY 3.0)。



## 成の観測

まず、電極が1対の場合の誘電体バリア放電と直流放電におけるプラズマチャンネル進展について説明する[8]。1×1 mm<sup>2</sup>の断面のプラズマチャンネルにおいて、カソード電極とアノード電極を露出させ、周波数 20 kHz 帯の低周波交流の印加電圧を増していったところ、進展初期は正負等量の電荷が行き来する誘電体バリア放電、チャンネルが両電極を結んだ後は誘電体バリア放電と直流放電が混成したプラズマが生成した(図1(a))。これらの放電形態の変化は、放電電流波形から得られるリサージュ図形(誘電体バリア放電の場合は正負等量の電荷、直流放電の場合は一方に偏った電荷を表現)により明確に観測されている(図1(b))。

次に、電極数を大幅に増やし(12対13、2次元上に交互配置)電極と誘電体のチャンネル部を誘電体層で隔てた状態で周波数 20 kHz 帯の低周波交流電圧を印加したところ、均一な誘電体バリア放電によるプラズマチャンネル形成を観測した(図2)。その後、電極パターンを変化させ(5対13、2次元上にランダム配置)プラズマ生成の様子を観測したところ、先ほどとは異なるパターンが現れた(図3)。すなわち、電極ごとに1対のペアを構成するのではなく、複数の電極同士が複雑にプラズマチャンネルを構成していることがわかる。また、この場合、電極と誘電体層の間の距離を可変とすることができる設計とした効果を確認するため、一部の電極の上下動を行ったところ、電極とチャンネル間のキャパシタ容量の変化に応じてプラズマ発光強度も変化することもわかった。

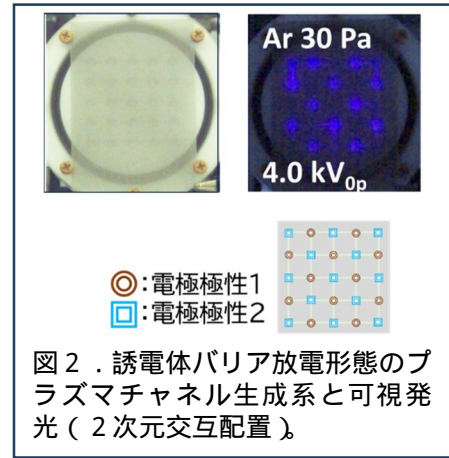


図2．誘電体バリア放電形態のプラズマチャンネル生成系と可視発光(2次元交互配置)

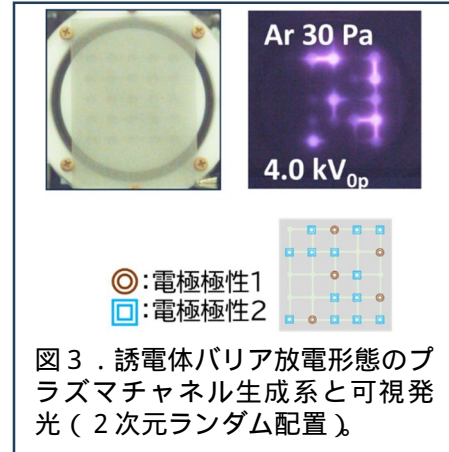


図3．誘電体バリア放電形態のプラズマチャンネル生成系と可視発光(2次元ランダム配置)

## (b) 強化学習系の最短物流ルート探索計算におけるエージェントの多数化

迷路解法や物流ルート設計法を含んで、一般的に計算機上で行われるルート探索解を求める場合、エージェントと呼ばれる探索主体の数はせいぜい10個程度が経路上を移動する状態で行われる。一方で、アナログコンピューティング手法では異なる形を取ることがあり、アメーバによる迷路解法[9]の場合、入口から出口まで生体が伸びる形態であり、経路自体に実体が常に存在する形で可視化される。本研究の場合も同様に入口から出口までの経路全体にプラズマが存在する形で可視化され、そしてそれを構成するのは(「10個程度」と比較すると)きわめて多数のプラズマ粒子による。本研究で実験結果の説明のための理論モデルを設定するとき、多数の粒子効果を含む粒子シミュレーションコード[10]による計算条件構築にまで手を伸ばすわけにはいかず、しかし多数のエージェント効果を取り入れることができれば好ましい。

そこで、本研究において本格的に強化学習法を参考とすることにした。例えば、Q学習[11]と呼ばれる手法において行動価値関数(Q値)の計算するとき、ランダムな多数試行を仮設定した上で報酬位置からQ値が対象位相空間上に伝搬する過程がある。この手法に着目し、プラズマチャンネル空間をネットワークモデルとした後、任意の頂点間を10,000回移動するプロセスを仮設定しつつ、Q値の広がり計算した。分析を進めたところ、もともとのQ学習で用いるQ値の更新式が、実はプラズマ中粒子の空間輸送式と酷似していることがわかり、唯一異なる内部関数(Q学習における最大値選択関数maxと、プラズマ中粒子の熱運動を模擬するランダム選択関数との違い)をランダム選択関数に書き換えることで、本研究における理論モデルを提案した[8]。実際の計算を行ってみると、本モデルでの計算により、Q値がより大きくなる選択を行うことで正しい経路選択が可能なることを示すことができた(図4)。

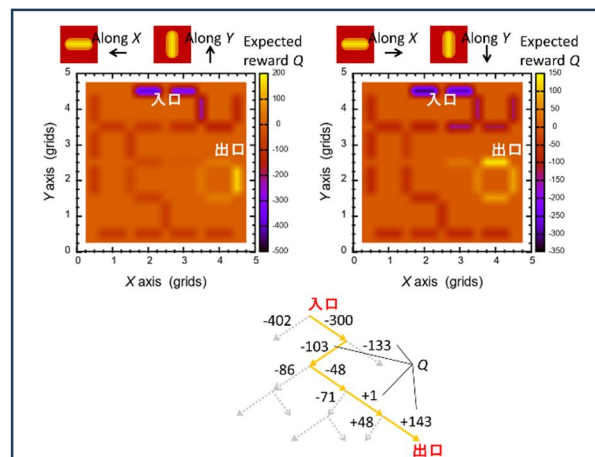


図4．強化学習法に基づき作成した理論モデルによる行動価値関数(Q値)の計算結果と迷路経路に沿った値の変化の様子。参考文献[8]より (by The Author(s) licensed under CC BY 3.0)。

## (c) プラズマチャンネル発光の高速動画観測とルート自動探索計算への組み込み

入口と出口の1対設定されている場合、プラズマチャンネルによって迷路解法が実現することがわかっている。では、複数の入口

と出口が設定されている場合、プラズマチャネルによりルート探索法が高速化可能かどうか、という点を調べるため、プラズマチャネルの発光がどの程度高速で現れているかを確認する必要がある。我々の実験では、kHz 帯の周波数でプラズマ生成が繰り返されており、誘電体バリア放電においては1回1回のプラズマ生成パターンが異なり、それらを蓄積して観測すると一様に見えていることがある[7]。

高速度カメラ (VE0-1310L-18G-C, Vision Research Inc.) を用いて、電源周波数を 100 kHz として撮影したところ、不明瞭ではあるが、静止画の場合 (図3) と同様のパターンが放電1回によって得られていることがわかった (図5)。すなわち、プラズマによるチャネル形成は 10  $\mu$ s で完了しており、計算機の計算能力と比べると桁違いに高速であることがわかる。

そして、このプラズマ発光パターンを計算機コードに条件として組み入れて計算を行ったところ、より良好な計算結果が得られた。具体的には、従来の Q 学習法に対して、荷物をピックアップする場所 (発地) と荷物を配達する場所 (着地) に対して仮想的な電位を割り当て、Q 学習法における報酬の設定に対応させた。かつ、Q 学習法におけるエージェントが搭載している荷物量に応じて発地と着地の報酬の符号を逆転させた。その上で、行動価値関数 (Q 値) の更新を十分に行った後、プラズマ発生部に対応する部分のみ Q 値を上昇させたところ、それを行わない場合に比べて約 10%ほど短い経路を計算開始後すぐに探索することができた。先に述べた、プラズマの高速生成の性質と合わせることで、実際の物流実施時に適用しうる高速ルート解法を、プラズマ発光の観測とそのデータセットを用いた計算機によるルート計算により実現することができたこととなる。

以上により、研究計画時に予定した内容について、すべて良好な成果を得ることができた。

#### 参考文献

- [1] Jaeger, H., Harald Haas, H.: Harnessing Nonlinearity: Predicting chaotic systems and saving energy in wireless communication. *Science* **304**, 78 (2004).
- [2] Karasaki, T., Sakai, O.: Maze-solving by long-path microchannel plasmas. *Proc. 10th International Workshop on Microplasmas* (Kyoto, 2019) p. O-25.
- [3] Ikai, R., Miyagi, S., Sakai, O.: Logistics route planning in agent-based simulation and its optimization represented in higher-order Markov-chain networks. *Complex Networks XII* (Springer International Publishing, 2021) p. 38.
- [4] Hughes, T. W., Williamson, I. A. D., Minkov, M., Fan, S.: Wave physics as an analog recurrent neural network. *Science Advances* **5**, eaay6946 (2019).
- [5] Monasson, R., Zecchina, R., Kirkpatrick, S., Selman, B., Troyanskyk, L.: Determining computational complexity from characteristic 'phase transitions.' *Nature* **400**, 133 (1999).
- [6] Okuma, T., Maruyama, H., Hashizume, T., Tanaka, M., Watanabe, T., Nagai, H., Koiwasaki, T., Nasu, H.: Effects of the Driving Frequency on Temperature in a Multiphase AC Arc. *IEEE Trans. Plasma Sci.* **47**, 32 (2019).
- [7] Somekawa, T., Shirafuji, T., Sakai, O., Tachibana, K., Matsunaga, K.: Effects of self-erasing discharges on the uniformity of the dielectric barrier discharge. *Journal of Physics D: Applied Physics* **38**, 1910 (2005).
- [8] Sakai, S., Karasaki, T., Ito, T., Murakami, T., Tanaka, M., Kambara, M., Hirayama, S.: Maze-solving in a plasma system based on functional analogies to reinforcement-learning model. *PLoS ONE* **19**, e0300842 (2024).
- [9] Nakagaki T, Yamada H, Toth A.: Maze-solving by an amoeboid organism. *Nature* **407**, 470 (2000).
- [10] Iwai, A., Sakai, O., Omura, Y.: One-dimensional particle simulation of wave propagation and generation of second harmonic waves in a composite of plasma and metamaterial. *Physics of Plasmas* **24**, 122112 (2017).
- [11] Watkins, C. J. C. H., Dayan, P.: Q-learning. *Mach Learning* **8**, 279 (1992).



図5 . 誘電体バリア放電形態のプラズマチャネル生成系と可視発光 (2次元ランダム配置、放電シングルショット像)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 Go Itami and Osamu Sakai	4. 巻 106
2. 論文標題 Independent control method for plasmonic skin depth based on transformation from spoof surface plasmon polaritons to bound states in the continuum	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 245406-1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.106.245406	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 Go Itami and Osamu Sakai	4. 巻 20
2. 論文標題 Formation of a Dirac cone and dynamic control of its half-metallic properties using double-layer ring dipole arrays	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 034012-1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevApplied.20.034012	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 Osamu Sakai, Toshifusa Karasaki, Tsuyohito Ito, Tomoyuki Murakami, Manabu Tanaka, Makoto Kambara, and Satoshi Hirayama	4. 巻 19
2. 論文標題 Maze-solving in a plasma system based on functional analogies to reinforcement-learning model	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 e0300842-1-17
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1371/journal.pone.0300842	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4件（うち招待講演 2件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Takuya Mizutomi, Yohei Sanami, Shigeyuki Miyagi, and Osamu Sakai
2. 発表標題 High density plasma activated by resonance properties of metamaterials and measurements of spatial distribution of plasma parameters
3. 学会等名 75th Annual Gaseous Electronics Conference（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Osamu Sakai
2. 発表標題 Metamaterials: Its Wide-Range Science and Flexible Technology
3. 学会等名 International Conference on Frontier Areas of Science & Technology, 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yohei Sanami, Takuya Mizutomi, Kota Hamano, Shigeyuki Miyagi, and Osamu Sakai
2. 発表標題 Improved controllability of high frequency inductively coupled plasma generation by series resonant metamaterial structures
3. 学会等名 25th International Symposium on Plasma Chemistry (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 酒井道
2. 発表標題 プラズマ周波数帯で発生する電磁波現象の新しい理解 - 対称性で理解する機能性 -
3. 学会等名 第19回プラズモニクスシンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

滋賀県立大学工学部電子システム工学科 ネットワーク情報工学分野のページ  
<http://www.e.usp.ac.jp/~edtw/index.html>

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
---------	---------