

令和 2 年 7 月 6 日現在

機関番号：24201

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18756

研究課題名（和文）プラズマをハードウェアとして実現する知能

研究課題名（英文）Behaviors with intelligence observed in plasmas

研究代表者

酒井 道（Sakai, Osamu）

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） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：プラズマをハードウェアとして用いて、「知能」（解の探索機能、学習効果による関数系実現、と仮定）的な振舞を実現した。弱電離プラズマが保持する知能性（電離現象における探索的要素、非線形性）に関する性質を明らかにし、それを通して、弱電離プラズマの新規応用の可能性探索と、知能性に関わる様々な自然・社会現象への視点の再発見への橋渡しを行った。より具体的には、解の探索機能としては、迷路（通路の枝分かれと行き止まりの構造の組み合わせ）を解くことに成功し、また学習効果による関数系実現については、プラズマとメタマテリアルのアレイ構造の生成機能におけるニューラルネットワーク機能の基本原則確認を遂行した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、これまでの学術的思考の流れ（専門化に平行した精緻な研究の推進）と明らかに異なる方向性を示すものだろう。プラズマ科学の分野において、関連の従来研究を見出すのは難しい。そして、プラズマのような曖昧模糊としたもので知能性を証明することで、曖昧模糊としているからこそその可能性、として、さらに他分野にも波及する普遍的で大きな学術的思考の転換を誘起しうると考えられる。複雑ネットワーク分野における巨視的で俯瞰的なものの見方、生態系の多様性の検討など、本研究と同様の概念に基づく研究も広がる兆しがあり、その流れを生み出す意味でも、挑戦的研究としての価値があると考えている。

研究成果の概要（英文）：We observed plasma behaviors with intelligence such as solver ability of searching roots and reproducible function via learning. Since low-pressure plasma possesses intelligent features like quest elements in ionization and nonlinearity it can be applicable to novel applications, leading to a new understanding of natural and social events. Specifically, maze solving was successful via ionization processes, and basic functions for neural networks was confirmed in plasma-metamaterial composites via a learning procedure.

研究分野：ネットワーク科学、プラズマ理工学

キーワード：プラズマ メタマテリアル 迷路探索 関数近似

1. 研究開始当初の背景

人間や高等生物は、単なる古典力学で表現されるような機能ではなく、何かを見つける、あるいは経験から学習する、といった知能を持っている。知能は、他の個体や他の種に対して優位性を獲得する技能（動機付けは含まない）と言え、その結果生まれる進化・改善効果は、自然界や人間社会が生産性や豊かさにおいて成長を続ける原動力である。

それに対し、非生物であっても、類似の“知能”を獲得することが実証されてきた。コンピュータ（種々の計算機能を行う処理機構とデータの記憶部分を持つ）による人工知能の実現がそれに当たる。これは、微細化された電子部品（トランジスタ等）が非常に多く蓄積され、その中に種々の非線形性を備えた特性が内包され、計算処理能力の向上と膨大な記憶（メモリ部でのデータ蓄積）が可能となったからである。

しかし、そのような知能性は、生体の脳かコンピュータでしか実現できないものであろうか。そこで、生物でもデザインされた回路網でもない、電力投入による気体の絶縁破壊で形成される弱電離プラズマがどの程度知能性を持ちうるか検討することを提案する。なぜプラズマに着目するかというと、プラズマは自由に動くことができかつ膨大な量の電子と正イオン（1 cm³に10億～100億個程度）により成り立っていること、またエネルギーが注入されて散逸する状態であることによる。図1に示すように、脳やコンピュータは、約1000億個の素子により構成されていると言え、プラズマの体積が1リットルあればコンピュータの素子数を上回る。そして、電子とイオンはお互いにクーロン力で相互作用しており、全体としての結合性がある。また、エネルギーの散逸体においては、エネルギーが流れる状態を時間で切り取ってみると、非線形性が現れる表層において取りうる形状は多様性に富む（シマウマの縞模様もこの表れの一つと言われる）。このようなことから想定されることとして、無機質なプラズマ現象内において、知能性の発現は十分に想定可能だと示唆される。

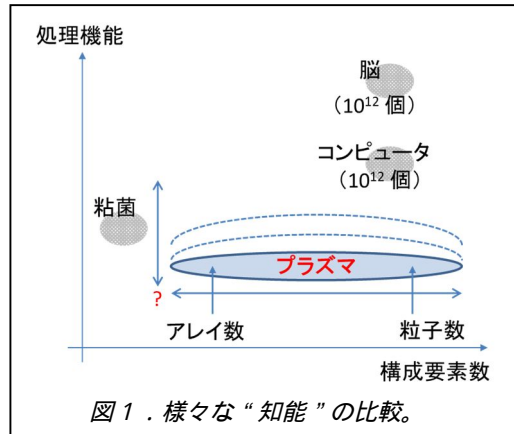


図1. 様々な“知能”の比較。

これまでに、意外な知能発現の研究としては、粘菌による迷路解きが報告されている[1]。これは、高等生物で無いとは言え、生存能力と自己複製機能を持つ生物である。それに対して、プラズマは、全くの無機物により構成され、電子と正イオンとで構成される“状態”であり、より（従来の指摘における）知能性から離れた状態である。もし、プラズマによる知能性の実現が証明されれば、他のいろいろな物質・状態において、様々なところに知能が溢れている、という解釈もありうる。すると、複雑な自然現象・社会現象の成り立ちに対する我々の考え方について再考を促すことになる。言葉を変えると、本研究は、様々な自然・社会現象の中に知能（あるいはその作用した結果）を見出す試みの第一歩とも言える。

本研究は、これまでの学術的思考の流れ（専門化に平行した精緻な研究の推進）と明らかに異なる方向性を示すものだろう。プラズマ科学の分野において、関連の従来研究を見出すのは難しい。そして、プラズマのような曖昧模糊としたもので知能性を証明することで、曖昧模糊としているからこそその可能性、として、さらに他分野にも波及しうる普遍的で大きな学術的思考の転換を誘起しうると考えられる。複雑ネットワーク分野における巨視的で俯瞰的なものの見方、生態系の多様性の検討など、本研究と同様の概念に基づく研究も広がる兆しがあり、その流れを生み出す意味でも、挑戦的研究としての価値があると言えるだろう。

2. 研究の目的

本研究では、プラズマをハードウェアとして用いて、「知能」（解の探索機能、学習効果による関数系実現、と仮定）を実現することを目的とした。弱電離プラズマが保持する知能性に関する性質を明らかにし、それを通して、弱電離プラズマの新規応用の可能性探索と、知能性に関わる様々な自然・社会現象への視点の再発見への橋渡しを行った。より具体的には、解の探索機能としては、迷路（通路の枝分かれと行き止まりの構造の組み合わせ）を解くことを例とし、また学習効果による関数系構築については、プラズマとメタマテリアルのアレイ構造の生成機能によるニューラルネットワーク形成の基本原則確認を遂行した。

3. 研究の方法

(1)迷路を解く

迷路を解くという課題は、ちょうど循環セールスマン問題[2]と同様に、選択肢が次々と現れる問題に対してしらみつぶし的に探索すると、対象とするパラメータ空間が大きくなるにつれて探索の手数が加速度的に大きくなることで、解を求めることが困難となる点が解探索を難解にしている。例えば、探索点（経路途中の点）が目標点（迷路の出口）から距離L離れていると

するとき、その面積的な広がりには L^2 と表現できるが、何らかの方法で、目標点の存在する方向だけでもわかれば、面 (L^2) 上に探索する必要はなく、探索量を L と減少させることができる。そして、自動的に位置を特定するためには、距離 L の値がわかればよい。もちろん迷路であるので、ただ何もない空間に置かれた物体の位置特定ではなく、その行く手を遮る壁が幾重にも待ち受けるので、向きと大きさで表現されるベクトル的な探索ではなく、(ランダムに向きを変える) 経路に沿った探索が必要となる。ここで注意しなければならないのは、単に目的点に対する距離に対して線形な関数機能では解の探索には非効率で、近づくと共に指標値が上昇する、といった非線形性が存在することが効果的である。これは、階層型ニューラルネットワークにおいて線形素子では学習効果が得られず、シグモイド関数(ロジスティック関数)のような非線形性が重要なところである。

このような観点で、プラズマ現象は十分に迷路解法に応用可能な“関数系”と言える。プラズマ現象を用いた迷路解法については先行報告[3]が1件あり、プラズマによる迷路探索においては電子の流れと電離波(ionization wave)が重要な役割を果たしているとしている。一方、我々の視点としては、下記の項目(2)と同様に、プラズマによって実現される非線形関数系がより重要でかつ知能性との関連の指摘に適していると考えている。また、文献[3]と同様に、プラズマ生成時の初期電子の動きが一つのキーとなるが、幅広い範囲で解探索が可能となるように、その初期電子が誘電体壁に蓄積されるメモリー効果(誘電体バリア放電の機構と同様のもの)を取り入れる系が好ましいと考えた。

以上の観点で、本研究においては以下のような実験を行った(図2)。十分に厚いテフロン板の表面に幅・深さが1mmの溝を形成して、プラズマが生成されて迷路の解であることを示す「チャンネル」とした。そして、1本10mmの長さのチャンネルをランダムに組み合わせて迷路を形成した。また、複数個所に直径1mmの貫通穴を開けてガス供給・排気口とし(Arガス、300Paを中心に、200-700Paで特性確認)、また別の直径1mmの穴に同サイズのステンレス棒を挿入してチャンネル内に露出させ、放電電極(ACパルス電圧印加(電源:PHF-2kW(ハイデン研究所)、20kHz))としつつ、迷路の入口と出口を模擬した。非常に細長い誘電体チャンネルの放電であるため、誘電体壁への電荷蓄積効果が顕著であると言える。

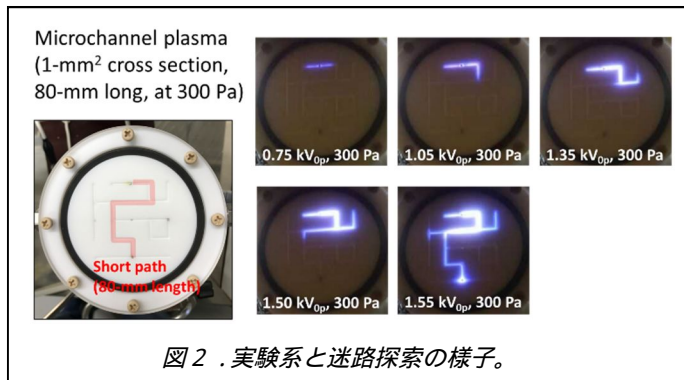


図2. 実験系と迷路探索の様子。

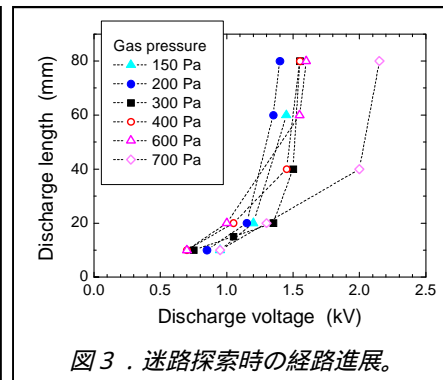


図3. 迷路探索時の経路進展。

(2) 学習効果により種々の関数を実現する

学習を経て複雑関数系を実現するデバイスに求められる要素は、以下の3点に集約できると考えられる。

- (a) 線形(入力 x に対して、 $ax + b$ (a, b は定数) と表現される)ではなく、非線形な応答をする素子機能がある[4]
- (b) 素子間が結合するための経路が種々存在する
- (c) 素子とその間に存在する経路の(組合せパターン)数が十分に多く存在する

(a)は、線形な素子をいくつ組み合わせても線形な特性しか示さないもので、パラメータ全体にわたって単調な特性・直線的な判別行為しか実現できないことを意味している。プラズマの場合、元来非線形性を有するので(a)の意味合いで適切であると同時に、今回活用するプラズマ・メタマテリアルの場合さらに強い非線形性が現れることがこれまでの検討でわかっている[5]。そして、(b)により実現できる関数系が多くなり、近似能力に関する汎用性が高まる。(c)についても、(b)と同様に、より複雑な関数系を実現すること、そして未学習データに対して適切な解を推定する汎化能力を保證することになる。なお、我々の場合、最終目標としてプラズマで教師有り学習器を実現したいわけではなく、その能力がある(あるいはそのような知能性を内在する)ことを示すことが目的である。

本研究では、上記の(b)と(c)については大まかで解析的な検討にとどめ、実験的にはプラズマ・メタマテリアルによって(a)に関してどのような特性が得られるのか、そして解析的な学習過程を経てどのような関数系を実現できるのか、例として判別分析を行った例を示す。

4. 研究成果

(1) 迷路を解く

放電電極へ印加する電圧を徐々に上げていくと(図2、図3)、まずカソード電極(高圧電圧印加電極)近辺でプラズマ発光が観測された。この時点ではアノード電極(接地電極)付近では発光は見られず、初期電子のやり取りはあっても、基本的には誘電体バリア放電の形態と言える。そして、電圧上昇とともに徐々に経路が進むが、経路の進み方は枝分かれ部も含めて正解でない経路にも発光部が進んでいくのがわかる。また、経路進展長は、正解経路が完成する直前に一気に進む。そして、最終的にアノード電極に発光部が到達する(経路長さ: 80 mm)と、正解経路の発光強度が一気に増し、直流的な電流も観測される。

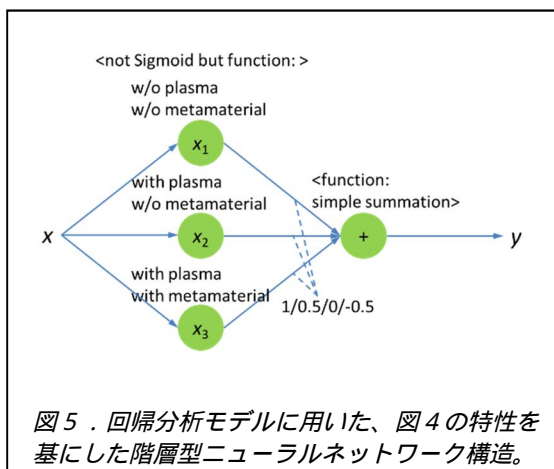
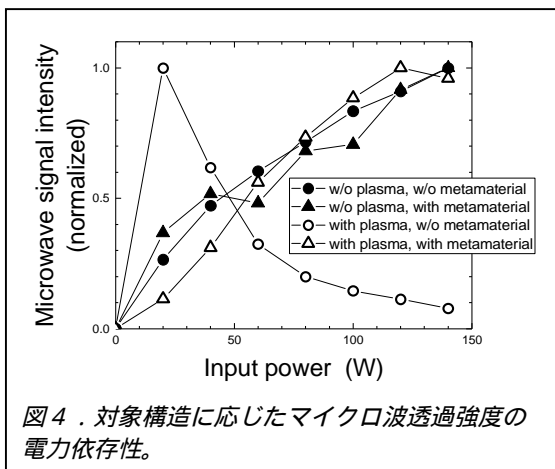
すなわち、迷路探索として、誘電体壁への電荷蓄積効果により種々の可能性を検討するが、アノード電極からのごく微量の初期(直流的)電子のやり取りを手掛かりに、正解経路に至ると考えられる。これは、強化学習におけるQ学習という手法における解探索の過程と酷似しており、そのような内容をプラズマの場合にはごく自然にふるまいながら実現していると言える。

(2) 学習効果により種々の関数を実現する

まず、実験系としては先の報告[5]と同様の実験装置において、種々の条件で透過するマイクロ波の信号を測定した。ガス圧力 100 Pa において、メタマテリアル(2重分割リング共振器アレイで構成)の有無しでプラズマを生成し、プラズマ・メタマテリアル部を透過するマイクロ波信号強度について、入射電力量の増加に伴う変化を記録した(図4)。すると、メタマテリアルの設置が無い場合にプラズマ生成を伴う場合は、入射電力が少ない領域では検出強度が高いものの、電力が上がるにつれて検出強度が減少した[6]。これは、プラズマ生成が進んで電子密度が上がるとともに、マイクロ波伝搬の遮断効果が顕著になることによる。一方、メタマテリアルを設置した場合には、入射電力が少ない領域から電力が上がるにつれて検出強度が増加し、飽和に至る。この様子は、あたかも、ニューラルネットワーク素子に用いられるシグモイド関数の出力の様子と類似した振る舞いである。さらに、プラズマ生成を伴わない場合の単調な信号強度変化の場合もデータとして取得した

これらの信号によりニューラルネットワーク型の素子を構成した場合、種々の重みによりどのような関数系が実現できるかについて、大まかに(すなわち、頂点間の有向枝の重みを4通りとして)検討したところ(図5)様々な形状の依存性を実現できることがわかった(図6)。例えば、ランダムなばらつきを持つ依存性37種類のうち、14種類を再現できることが確認できた。これは、どの程度回帰分析に対応できるかについて示す指標と言える。プラズマのみの特性では、2種類しか実現できず、プラズマ・メタマテリアルの強い非線形性が多様な関数系の実現のために重要であることがわかる。さらに、企業の投資格付けデータ[7]について重み調整を行って判別分析を行ったところ(図7)成功率は95.4%となった。線形判別の場合には93.1%について成功することがわかっており、それと比較してより良好な結果を得た。これは、先に挙げた項目(a)の効果が明確に出たものと言える。

以上の検討より、プラズマは、知能と同様に巧緻なパラメータ値の扱い能力がそもそも内在している存在であると言える。今回は、学習効果を実現している重み調整の部分は、基本要素関数を実験で取得した後、それらに基づいた解析処理に依拠したが、次のステップとしては、3つの要素(プラズマ生成無し・メタマテリアル無し、プラズマ生成有り・メタマテリアル無し、プラズマ生成有り・メタマテリアル有り)をそれぞれ3領域とするプラズマ・メタマテリアル空間の外側領域(3出力としてのマイクロ波がそれぞれ伝搬してくる空間)において、それらの合成信号が、与えられた学習データを満たすように構成されることで、実際のハードウェアとして完結する。しかし、再度繰り返すが、本研究の究極の目標はプラズマで教師有り学習が可能なニューラルネットワーク素子を実現するのではなく、同様の巧妙・複雑な関数実現(関数近似)能力をプラズマが内在することの証明であり、その基盤部分の実証が本研究でなされたと考えている。



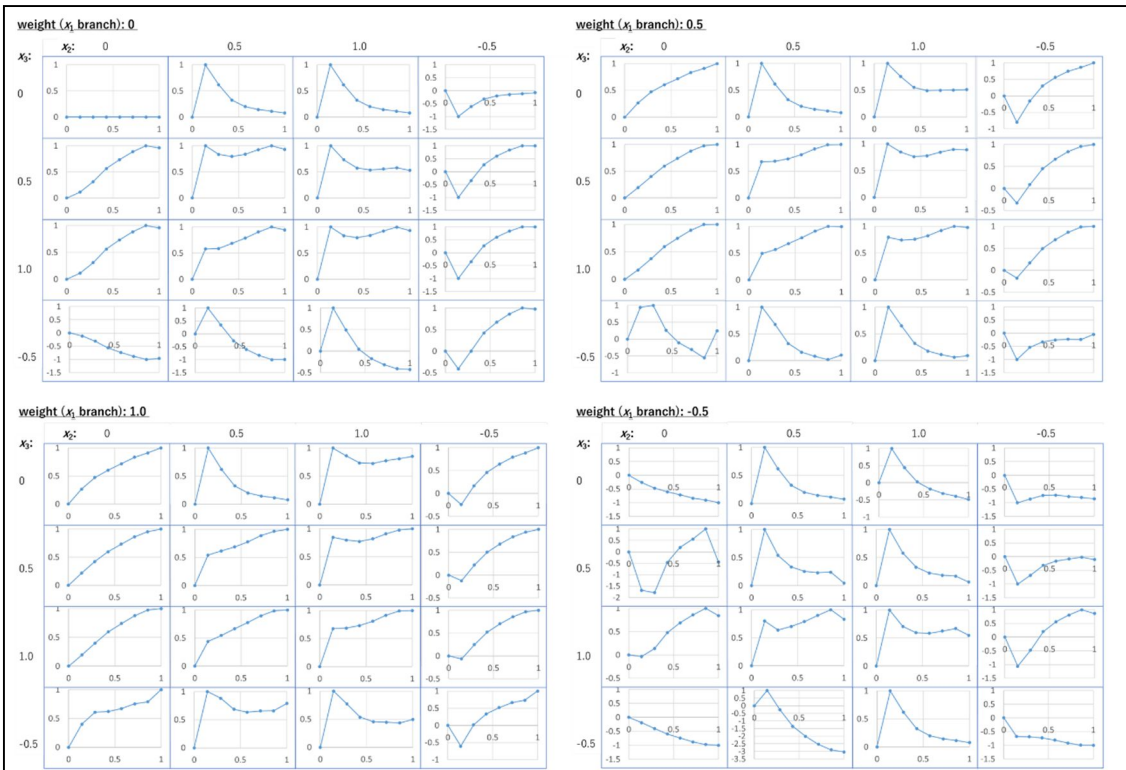


図6 . 図4 の特性を持った素子を図5 の構造で配置した時に得られる各種の関数系。

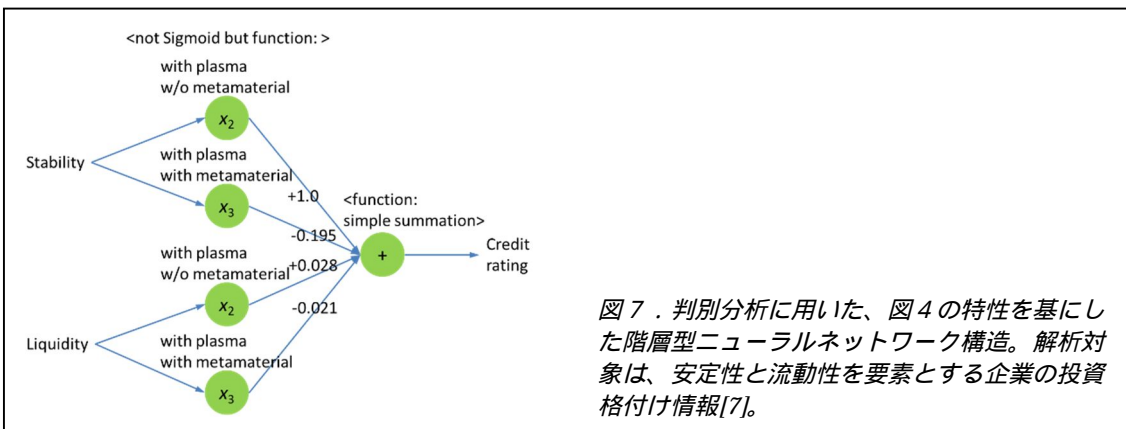


図7 . 判別分析に用いた、図4 の特性を基にした階層型ニューラルネットワーク構造。解析対象は、安定性と流動性を要素とする企業の投資格付け情報[7]。

参考文献

[1] T. Nakagaki et al., *Nature* **407**, 470 (2000).
 [2] D. Applegate et al., *Traveling Salesman Problem: A Computational Study* (Princeton University Press, Princeton, 2006).
 [3] A. E. Dubinov et al., *Phys. Plasmas* **21**, 093503 (2014).
 [4] J. Hertz, A. Krogh and R. G. Palmer, *Introduction to the Theory of Neural Computation* (Taylor & Francis (CRC Press), Boca Raton, 1991) p. 108.
 [5] Y. Nakamura, A. Iwai and O. Sakai, *Plasma Sources Sci. Technol.* **23**, 064009 (2014).
 [6] A. Iwai, Y. Nakamura, O. Sakai and Y. Omura, *Plasma Sources Sci. Technol.* **29**, 035012 (2020).
 [7] 技術評論社ホームページ・書籍案内>>イメージでつかむ機械学習入門(横内大介、青木義充著) <https://gihyo.jp/book/2017/978-4-7741-9062-4/support> .

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 0件）

1. 著者名 A. Iwai, Y. Nakamura, O. Sakai and Y. Omura	4. 巻 29
2. 論文標題 Localized breaking of parameter uniformity by macroscopically-negative-permeability metamaterial in low-pressure microwave plasma	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plasma Sources Science and Technology	6. 最初と最後の頁 035012-1-16
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1088/1361-6595/ab2d74	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7件（うち招待講演 3件／うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Osamu Sakai, Tetsuya Kojima
2. 発表標題 Analysis on Equation System in Textbook in Electromagnetics on Aspect of Network Topology
3. 学会等名 PIERS (Progress In Electromagnetics Research Symposium) 2018 Toyama (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 O. Sakai, Y. Mizui, T. Kojima, M. Koshihara, A. Iwai, S. Miyagi, T. Murakami
2. 発表標題 Macroscopic visualization for statistics and microscopic identification of species roles in web-like plasma-enhanced chemical networks
3. 学会等名 71st Annual Gaseous Electronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Kojima, J. Ishida, S. Miyagi and O. Sakai
2. 発表標題 Network property and learning model of weblike equation system in a scientific category
3. 学会等名 The 7th International Conference on Complex Networks and Their Applications (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 O. Sakai, Y. Mizui, M. Koshiba and S. Miyagi
2. 発表標題 Weblike Network in Plasma Chemistry and Its Understanding for Plasma Nanomaterial Science
3. 学会等名 28th Annual Meeting of MRS-Japan 2018 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Toshifusa Karasaki and Osamu Sakai
2. 発表標題 Maze Solving by Long Path Microchannel Plasmas
3. 学会等名 10th International Workshop on Microplasmas (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Tsukamoto, Y. Mizui, S. Miyagi and O. Sakai
2. 発表標題 Complex chemical reactions in low-temperature ammonia plasma
3. 学会等名 The Joint Conference of XXXIV International Conference on Phenomena in Ionized Gases and the 10th International Conference on Reactive Plasmas (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 O. Sakai
2. 発表標題 Weblike chemical systems and their network topology in low temperature reactive plasmas
3. 学会等名 72nd Annual Gaseous Electronics Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019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
--	---------------------------	-----------------------	----