

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：24201

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H03690

研究課題名(和文) プラズマ複合構造体によるメタマテリアルの拡張概念の実証

研究課題名(英文) Verification of enlarged concept of metamaterials by plasma composites

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) 33,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、プラズマとメタマテリアルの複合構造体のマルチスケール性・超広帯域周波数分散特性を基に、その高エネルギー性から生じる新奇物理解明を目的としている。プラズマ複合構造体は、通常メタマテリアル中の伝搬電磁波のエネルギー密度より数桁高い値を持つため、エネルギー平衡・エネルギー変換・非線形現象に特異性を備える。この性質に基づき、物理・工学の両面から“パワー・メタマテリアル”分野を確立するため、実験・理論の両面で研究を遂行した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

メタマテリアルという、これまでにないパラメータを実現できる媒質・物質をプラズマの中に導入することで、負屈折率状態のみならず、電磁波のクローキング(隠れ蓑)現象・吸収現象・集光現象・散乱現象を制御性良く実現するとともに、その非線形性の検討およびそのパラメータ領域の拡大にも貢献できた。さらに、プラズマ・メタマテリアルの考え方をマイクロ波帯電磁波のみならず、光波領域へ拡大するための基礎知見の充実に努めた。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study on plasma-metamaterial composites is verification of novel physical mechanisms arising from their high-energy states, based on their multi-scale properties and super wide-band frequency dispersions. They possess internal high-energy density by several orders of magnitude, in comparison with that of conventional metamaterials, leading to abnormal phenomena related to energy equilibrium, energy conversion and nonlinearity. Thus, from both physical and technological points of views, we performed this study both theoretically and experimentally.

研究分野：プラズマ理工学

キーワード：プラズマ メタマテリアル マイクロ波 赤外材料・素子 微粒子

1. 研究開始当初の背景

物質が持つエネルギーは多様な自然現象をもたらす源であり、物質の相転移・エネルギー変換等の現象は、実用的な利便性のためにも、未知の自然現象を解明する着眼としても、本質的である。一方、“物質”の革新を図るものとして、負の屈折率状態等の特異な特性を示す“メタマテリアル”が2000年前後に提案され、追って実証されたクローキング(隠れ蓑)現象等、電磁波の自在な制御をもたらす設計可能な媒質材料が実現した。しかし、通常の固体で構成されるメタマテリアルでは、内部にエネルギー効果を含めることは困難である。

そのような状況下で2007年に我々は、メタマテリアルの要素としてプラズマを含む“プラズマ・メタマテリアル”を提案した。そして、これまでに、特性の可変性(プラズマのオンオフ効果等で誘電率変化)の確認、特性の広帯域化(kHz帯低周波から光領域まで)の実現に取り組んできた。これらは、極小の自由電子によるドルーデ型分散特性、 μm サイズの荷電微粒子とその金属ナノアセンブリー修飾(赤外光領域でのメタマテリアル性)による光応答性、そしてcmオーダーのメタマテリアル構造という、マルチスケール構造の協同現象に基づいている。

その後、我々は(1)非線形動力学的な誘電率・屈折率の遷移現象の観測、(2)高効率高調波生成の観測、(3)簡易なクローキング構造の理論発見を行った。例えば、パラメータ可変性より、屈折率の複素平面上で特性点が可動という従来メタマテリアルには無い特性を示すが、それに加えて(1)により特性点の不連続な飛躍が生じる。また、マイクロ波帯では、プラズマ単独の場合の100倍以上の高強度2倍高調波が観測された。この(1)と(2)は典型的な非線形動力学・非線形光学現象であり、プラズマ・メタマテリアルが持つ高エネルギー性を示唆する。さらに、(3)の簡易クローキング構造を応用し、高エネルギーマイクロ波の伝搬制御も期待できる。

現在のメタマテリアル科学の動向として、量子メタマテリアルの検討、音波・弾性波等への応用、あるいは低次元化されたメタ表面の提案などがあり、分野を広げつつ深化も進んでいる。これらに加え、本検討は、メタマテリアルに高エネルギー性を付与する観点で恐らく世界的に唯一の取組であり、別分野でパワーエレクトロニクスが果たしたように、豊かな開拓方向性を備える“パワー・メタマテリアル”とも言うべき新たな潮流の端緒となりうる。

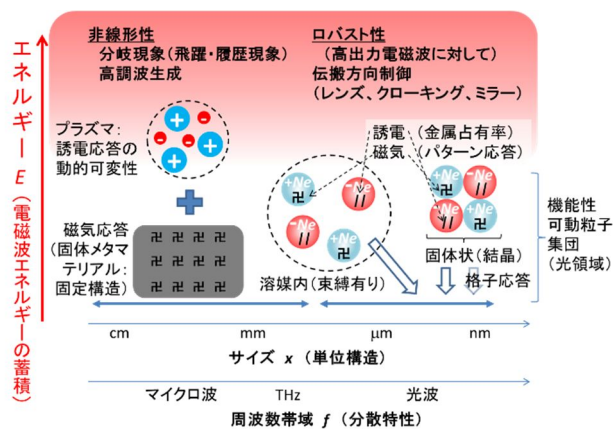


図1. プラズマ・メタマテリアル複合体の概念図。

2. 研究の目的

本研究では、プラズマとメタマテリアルの複合構造体のマルチスケール性・超広帯域周波数分散特性を基に、その高エネルギー性から生じる新奇物理解明を目的とした。プラズマ複合構造体は、通常のメタマテリアル中の伝搬電磁波のエネルギー密度より数桁高い値を持つため、エネルギー平衡・エネルギー変換・非線形現象に特異性を備える。この性質に基づき、物理・工学の両面から“パワー・メタマテリアル”分野を確立するため、実験・理論の両面で研究を遂行した。

3. 研究の方法

本研究では、実験と理論、電磁波の周波数帯としてもマイクロ波と光波、として、統合的に「プラズマ+メタマテリアル」の機能性検証を行った。マイクロ波実験においては、携帯電話レベルの小電力マイクロ波から数100Wレベルの大電力マイクロ波を制御対象とし、それぞれの実験目的に応じて既設の真空チャンバーやガラスキャピラリー等を用いた。すなわち、通常のプラズマ実験のような金属筐体の形状等はむしろ重要ではなくなり、金属の構造体であるメタマテリアルが構造骨格となり、また境界条件ともなる。光波対応においては、溶液中の微粒子を対象として、その可動性を考慮することでプラズマとのアナロジ的な同義性を確保しつつ、金属のフラクタル構造等の自己組織化構造を用いて光波に対応できるメタマテリアル作成を目指した。理論検討においては、独自に開発している粒子モデル・FDTD(Finite Difference Time Domain)法モデル等を用いつつ、実験検証や実験予測に取り組んだ。

4. 研究成果

4.1 マイクロ波領域(1) クローキング現象を含む統合的マイクロ波制御デバイス機能[2,5,14]

まず、プラズマとメタマテリアルの複合構造体に対して、入射電磁波が線形領域である場合に観測した、多様な電磁波制御現象について、理論と実験の両面で説明する。通常のメタマテリアル

ル研究で示されているクローキング現象のみならず、吸収・集光・散乱現象についても、本複合構造体では実現することができ、それを今回の研究で総合的にまとめることができた(図1)。メタ材料は二重分割リング共振器(DSRR)のアレイ構造で構成し、共振周波数は約2.4 GHzに設定することで、そのごく高周波側で比透磁率は負あるいはゼロ程度で、そこから周波数があがると0-1の間で変化しつつ、DSRRの2次元構造から異方も発現する。また、別途設定した高周波(27.12 MHz)印加のポール状電極によりプラズマ生成を行うと電子密度は 10^{17} m^{-3} 程度となり、電子密度が 10^{17} m^{-3} の場合比誘電率は約27 GHzでゼロ・それより低周波数側で負・高周波数側で正となる。この2つの値の変化に応じて屈折率が決まり、2.5-2.7 GHz帯で屈折率の虚部が大きくなり吸収現象、2.7 GHzを超えると比透磁率・比誘電率とも正の小さな値となりクローキング現象、それより高周波数帯側では屈折率が1と異なる正の値となって散乱現象が発生すると見込まれる。マイクロ波の2次元強度分布測定実験においてもその様子が観測され、2.69 GHzで吸収・2.89 GHzでクローキング・3.05 GHzで散乱現象が発生し、かつ散乱現象の一形態として電波レンズとして動作する集光現象も3.00 GHzで観測した。これは、検出した2次元分布値の積分値から散乱断面積相当の値を評価することで、各現象の定量レベル評価が可能であることも確認した。

次に、このような線形領域での特性に対して、マイクロ波電力を増加させていったときに、どのような非線形現象が現れるかについて、実験検討を行った。以前に報告済の理論予測によると、プラズマ生成に伴うサドルノード分岐を経て、大きな履歴現象が発生し、同じ電力値で誘電率が正と負に分岐すると予想される。先の実験と同様の特性を持つメタ材料を使用し、2.45 GHz(透磁率が負となる周波数)のマイクロ波の電力を単独で投入し、徐々に電力を増加させていくと、100-150 Wの電力時に安定してプラズマ生成が発生することがわかった。一方で、メタ材料が無い空間においては、入射電力20-100 Wでランダムにプラズマ生成が生成され始めた。これは、メタ材料による空間透磁率制御効果による分岐現象が実験的に観測されたことを示しており、また電力特性から大電力マイクロ波スイッチとして機能発現可能と言える。

4.2 マイクロ波領域(2)メタサーフェイスにおける群遅延現象におけるプラズマ生成現象 [11,13,17,18,20,22]

上記のプラズマ生成を伴う非線形現象をさらに低電力化し種々の活用に供するよう、メタ材料の単位構造を取り出し、メタサーフェイスとして設計を行った。2つの共振器の周波数を少しずつして設定すると、その中間の周波数付近で共振現象に加えて群遅延伝搬現象が重畳し、結果として入射電磁波の電界がギャップ構造部分で大きく増強される。その状態でマイクロ波を入射すると、例えば0.5-5 Wと、先の結果の1/10以下のマイクロ波電力で履歴現象・スイッチング現象を観測した。プラズマ生成現象のみに限ると、最小で携帯電話電力レベルのマイクロ波でのプラズマ生成が実現している。このように、電子回路の能動素子等を用いず、プラズマとメタ材料を複合させることで、非線形効果の発現条件を制御できることが確認できた。

4.3 光領域における金属ナノ構造体による共鳴現象観測と微粒子の可動性解析 [1,7,8,15,16]

以上のようなマイクロ波帯でのメタ材料効果効果を光領域に拡張するための検討として、自己組織化現象を用いたスプリットリング様構造による赤外吸収特性の測定と理論

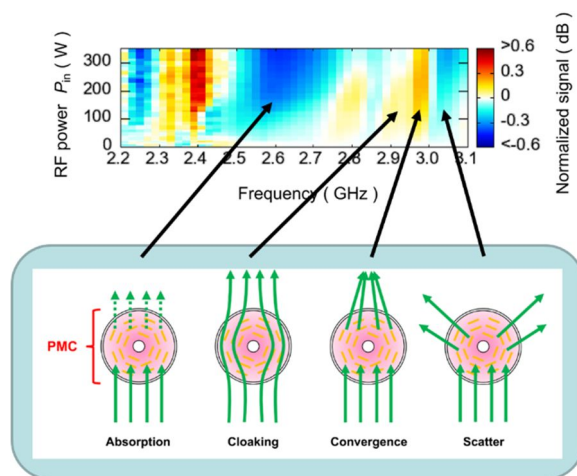


図2. プラズマ・メタ材料複合体による透過電磁波スペクトル(電磁波の総合的制御)。

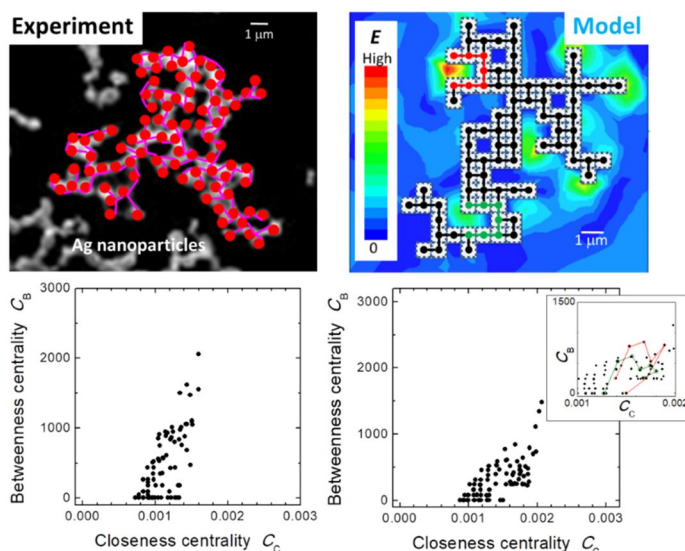


図3. フラクタル状銀ナノ粒子構造と理論モデルにおける赤外スペクトル予測モデル。

モデル構築を行った(図3)。硝酸銀液滴を別途大気圧プラズマで生成した還元気体であるヒドラジン流にさらしたところ、フラクタル状の銀ナノ粒子2次元構造が観測された。これをFTIR法により診断すると、特定かつ規則的な波数間隔の位置で常に吸収現象を観測した。ランダムな周波数での吸収現象でないことに注目し、銀ナノ粒子の自己組織化モデルによる形状形成シミュレーションと電磁波特性計算を行ったところ、フラクタル状構造内に多くの分割リング構造が現れ、そこで共振現象が起こっていることを確認した。特定の周波数で異常吸収現象が発生する理由としては、フラクタル状構造を構成する銀ナノ粒子の粒子サイズがほぼ一定である、という点で説明できることもわかった。つまり、微細構造をフォトマスクにより設定する必要がない、安価な光メタマテリアルの可能性を開くことができた。

また、微粒子を可動状態にして光素子として活用することを想定した検討を、理論検討を中心に行った。溶媒内粒子の動作として、2流体界面にとどまる粒子と界面の協奏的な可動性・制御性を確認し、可動な光メタサーフェスの実現に近づいたと言える。また、微粒子にレーザー光を照射することで、光エネルギーが他のエネルギーへの変換される過程を通じた制御性の定式化を進めることができた。光ピンセットの同様の機構や、音響エネルギー放出素子として機能を明らかにし、そのような光エネルギー変換過程を通して、光メタマテリアルの非線形効果誘起への道筋を描くことができた。

4.4 その他の成果[2,3,4,6,9,10,12,19,21]

その他、上記の基幹的成果の関連内容として多くの成果が得られたが、紙面の都合でその要約のみを以下に示す。

- ・プラズマを用いたプラズモニッククロッキングの実験実証
- ・疑似表面プラズモン現象におけるバビネの原理の破綻条件の導出
- ・国際共同研究によるプラズマ・メタマテリアル複合体の負の屈折率状態の実証
- ・真空チャンバー内センサとチャンバー外機器との間のマイクロ波信号伝送の確認
- ・溶媒内に分散する微粒子サイズと赤外光の波長に対する散乱モード変化の確認

<引用文献>

- [1] N. Kihara and O. Sakai: "Topological network properties of fractal-like metallic nanoparticle patterns and their effects on optical resonances." *Applied Sciences* **8**, 1310-1-13 (2018)
- [2] T. Naito, T. Tanaka, Y. Fukuma and O. Sakai: "Electromagnetic wave cloaking and scattering around antiresonance-resonance symmetrical pair in frequency domain." *Physical Review E* **99**, 013204-1-9 (2019)
- [3] G. Itami, O. Sakai and Y. Harada: "Two-Dimensional Imaging of Permittivity Distribution by an Activated Meta-Structure with a Functional Scanning Defect." *Electronics* **8**, 239-1-16 (2019)
- [4] G. Itami and O. Sakai: "Symmetrical estimation method for skin depth-control of spoof surface plasmon by using dispersed waves from metallic hole array." *Journal of Applied Physics* **125**, 213101-1-7 (2019)
- [5] T. Naito and O. Sakai: "Analytical formulation for radiation characteristics of a surface wave sustained plasma antenna." *Physics of Plasmas* **26**, 073506-1-8 (2019)
- [6] A. Iwai, F. Righetti, B. Wang, O. Sakai, and M. A. Cappelli: "A tunable double negative device consisting of a plasma array and a negative-permeability metamaterial." *Physics of Plasmas* **27**, 023511-1-6 (2020)
- [7] Yasushi Mino, Hiroyuki Shinto: "Lattice Boltzmann method for simulation of wetttable particles at a fluid-fluid interface under gravity." *Physical Review E* **101**, 033304-1-15 (2020)
- [8] Hiroyuki Shinto, Tomonori Fukasawa (Ko Higashitani, Hisao Makino, Shuji Matsusaka (eds.)): *Powder Technology Handbook, Fourth Edition*. (CRC Press, Boca Raton, 2019) p. 8
- [9] Go Itami and Osamu Sakai: "Analysis and Observation of the Breakdown of Babinet's Principle in Complementary Spoof Surface Plasmon Polariton Structures." *Scientific Reports* **10**, 11027-1-15 (2020)
- [10] Osamu Sakai, Takayuki Kitagawa, Keiji Sakurai, Go Itami, Shigeyuki Miyagi, Kazuyuki Noborio and Kohshi Taguchi: "In-vacuum active colour sensor and wireless communication across a vacuum-air interface." *Scientific Reports* **11**, 1364-1-11 (2021)
- [11] Yasuhiro Tamayama and Kengo Kanari: "Storage and release of electromagnetic waves using a Fabry-Perot resonator that includes an optically tunable metamirror." *Physical Review B* **102**, 035162-1-9 (2020)
- [12] Yasutaka Mizui, Shigeyuki Miyagi, and Osamu Sakai (R. M. Benito et al. (eds.)): *Complex Networks & Their Applications IX* (Springer Nature Switzerland AG, Cham, 2021) 12 (715 頁中)
- [13] 玉山 泰宏, *メタマテリアル、メタサーフェスの設計・作製と応用技術* (R&D 支援センター, 2020) p. 13
- [14] Chui Inami, Yuki Kabe, Yota Noyori, Akinori Iwai, Alexandre Bambina, Shigeyuki Miyagi, and Osamu Sakai: "Experimental observation of multi-functional plasma-metamaterial composite for manipulation of electromagnetic-wave propagation." *Journal of Applied Physics* **130**, 043301-1-13 (2021).
- [15] Yasushi Mino, Hazuki Tanaka, Koichi Nakaso, Kuniaki Gotoh, and Hiroyuki Shinto: "Lattice Boltzmann model for capillary interactions between particles at a liquid-vapor interface under gravity." *Physical Review E* **105**, 045316-1-15 (2022)
- [16] 新戸浩幸, 深澤智典, 「光泳動、光ピンセット、光音響」粉体工学会誌 **58**, 557-567 (2021)

- [17] Yasuhiro Tamayama and Ryosuke Yamada: “Low-power threshold gas discharge by enhanced local electric field in electromagnetically-induced-transparency like metamolecules.” *Journal of Physics D: Applied Physics* **54**, 385103-1-7 (2021)
- [18] 玉山泰宏, 「動的メタマテリアルを利用した電磁波制御」FCレポート **39**, 60-65 (2021)
- [19] Ryota Ikai, Shigeyuki Miyagi and Osamu Sakai (A. S. Teixeira et al. (eds.)) : *Complex Networks XII* (Springer International Publishing, 2021) p. 13
- [20] 玉山泰宏, *メタマテリアルの設計、作製と新材料、デバイス開発への応用* (技術情報協会, 2022) p.7
- [21] Osamu Sakai, Satoru Kawaguchi, and Tomoyuki Murakami: “Complexity visualization, dataset acquisition, and machine learning perspectives for low-temperature plasma: a review.” *Japanese Journal of Applied Physics* **61** (2022) (in Press)
- [22] Yasuhiro Tamayama and Hiromu Yamamoto: “Broadband control of group delay using Brewster effect in metafilms.” *Physical Review Applied* **17** (2022) (in Press)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 14件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Go Itami and Osamu Sakai	4. 巻 10
2. 論文標題 Analysis and Observation of the Breakdown of Babinet's Principle in Complementary Spoof Surface Plasmon Polariton Structures	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 11027-1-15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-020-67923-5	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 -
1. 著者名 Osamu Sakai, Takayuki Kitagawa, Keiji Sakurai, Go Itami, Shigeyuki Miyagi, Kazuyuki Noborio and Kohshi Taguchi	4. 巻 11
2. 論文標題 In-vacuum active colour sensor and wireless communication across a vacuum-air interface	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1364-1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-020-80501-z	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 Yasuhiro Tamayama and Kengo Kanari	4. 巻 102
2. 論文標題 Storage and release of electromagnetic waves using a Fabry-Perot resonator that includes an optically tunable metamirror	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 035162-1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.102.035162	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 Go Itami and Osamu Sakai	4. 巻 125
2. 論文標題 Symmetrical estimation method for skin depth-control of spoof surface plasmon by using dispersed waves from metallic hole array	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 213101-1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5088116	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 Teruki Naito and Osamu Sakai	4. 巻 26
2. 論文標題 Analytical formulation for radiation characteristics of a surface wave sustained plasma antenna	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 073506-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5088855	査読の有無 無
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 Akinori Iwai, Fabio Righetti, Benjamin Wang, Osamu Sakai, and Mark A. Cappelli	4. 巻 27
2. 論文標題 A tunable double negative device consisting of a plasma array and a negative-permeability metamaterial	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 023511-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5112077	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 該当する

1. 著者名 Yasushi Mino, Hiroyuki Shinto	4. 巻 101
2. 論文標題 Lattice Boltzmann method for simulation of wettable particles at a fluid-fluid interface under gravity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 033304-1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.101.033304	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 Naoya Kihara and Osamu Sakai	4. 巻 8
2. 論文標題 Topological network properties of fractal-like metallic nanoparticle patterns and their effects on optical resonances	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 1310-1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app8081310	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 Teruki Naito, Tai Tanaka, Yuichiro Fukuma and Osamu Sakai	4. 巻 99
2. 論文標題 Electromagnetic wave cloaking and scattering around antiresonance-resonance symmetrical pair in frequency domain	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 013204-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.99.013204	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, Osamu Sakai and Yasunori Harada	4. 巻 8
2. 論文標題 Two-Dimensional Imaging of Permittivity Distribution by an Activated Meta-Structure with a Functional Scanning Defect	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Electronics	6. 最初と最後の頁 239-1-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/electronics8020239	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 Osamu Sakai, Satoru Kawaguchi, and Tomoyuki Murakami	4. 巻 -
2. 論文標題 Complexity visualization, dataset acquisition, and machine learning perspectives for low-temperature plasma: a review	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Yasuhiro Tamayama and Hiromu Yamamoto	4. 巻 -
2. 論文標題 Broadband control of group delay using Brewster effect in metafilms	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Chui Inami, Yuki Kabe, Yota Noyori, Akinori Iwai, Alexandre Bambina, Shigeyuki Miyagi, and Osamu Sakai	4. 巻 130
2. 論文標題 Experimental observation of multi-functional plasma-metamaterial composite for manipulation of electromagnetic-wave propagation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 043301-1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0048004	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 Yasushi Mino, Hazuki Tanaka, Koichi Nakaso, Kuniaki Gotoh, and Hiroyuki Shinto	4. 巻 105
2. 論文標題 Lattice Boltzmann model for capillary interactions between particles at a liquid-vapor interface under gravity	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 045316-1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.105.045316	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 新戸浩幸, 深澤智典	4. 巻 58
2. 論文標題 光泳動、光ピンセット、光音響	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 粉体工学会誌	6. 最初と最後の頁 557-567
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4164/sptj.58.557	査読の有無 無
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 Yasuhiro Tamayama and Ryosuke Yamada	4. 巻 54
2. 論文標題 Low-power threshold gas discharge by enhanced local electric field in electromagnetically-induced-transparency like metamolecules	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 385103-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6463/ac0d50	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 玉山泰宏	4. 巻 39
2. 論文標題 動的メタマテリアルを利用した電磁波制御	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 FCレポート	6. 最初と最後の頁 60-65
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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34件 (うち招待講演 9件 / うち国際学会 25件)

1. 発表者名 Osamu Sakai, Akinori Iwai and Shigeyuki Miyagi
2. 発表標題 Microwave plasma source based on plasma-metamaterial nonlinearity
3. 学会等名 73rd Annual Gaseous Electronics Virtual Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Chui Inami, Yuki Kabe, Akinori Iwai, Alexandre Bambina, Shigeyuki Miyagi, Osamu Sakai
2. 発表標題 Control of microwave propagation property with metamaterials and tuned plasma
3. 学会等名 73rd Annual Gaseous Electronics Virtual Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masataka Koshiba, Shigeyuki Miyagi, Tsuyohito Ito, Yusuke Sugiyama, Osamu Sakai
2. 発表標題 Singular-point reproducibility for physical phenomenon in supercritical plasma analyzed by network model
3. 学会等名 73rd Annual Gaseous Electronics Virtual Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yasutaka Mizui, Shigeyuki Miyagi, and Osamu Sakai
2. 発表標題 Statistics of Growing Chemical Network Originating from One Molecule Species and Activated by Low-Temperature Plasma
3. 学会等名 the Ninth International Conference on Complex Networks and Their Applications COMPLEX NETWORKS 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Osamu Sakai
2. 発表標題 Analysis of Visualized Complex Reaction Network in Low Temperature Molecular Plasma
3. 学会等名 ISSM 2020 - International Symposium on Semiconductor Manufacturing (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本 大夢, 玉山 泰宏
2. 発表標題 プリユースターメタ薄膜による広帯域群遅延制御
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山田 涼介, 玉山 泰宏
2. 発表標題 電磁誘起透明化メタ表面のキャパシタ構造の先鋭化による局所電場増強とそれを用いたマイクロプラズマ生成
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Osamu Sakai
2. 発表標題 Brief review on plasma photonics crystals, plasma metamaterials and plasma antennas: opening of satellite workshop on plasma metamaterials
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 Chui Inami, Yuki Kabe, Akinori Iwai, Alexandre Bambina, Shigeyuki Miyagi, and Osamu Sakai
2. 発表標題 Observation of flattened profile of microwaves propagation by plasma metamaterials
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 Osamu Sakai
2. 発表標題 Fractal-like structures composed of Ag nano-particles forming in AgNO ₃ solution exposed to atmospheric pressure ammonia plasma
3. 学会等名 2nd Nucleation & Growth Research Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 O. Sakai, A. Iwai, A. Bambina, Y. Kabe, C. Inami, G. Itami, T. Naito, S. Miyagi
2. 発表標題 Plasma metamaterials: present and future
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 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 C. Inami, Y. Kabe, A. Iwai, A. Bambina, S. Miyagi, O. Sakai
2. 発表標題 Experimental approach to flattening profiles in diffraction-loss area of microwaves using plasma-metamaterial structure
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 Osamu Sakai, Akinori Iwai, Fabio Righetti, Benjamin Wang and Mark Cappelli
2. 発表標題 Tunable negative refraction device composed of negative permittivity plasma and negative permeability metamaterial
3. 学会等名 72nd Annual Gaseous Electronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 新戸浩幸
2. 発表標題 固体表面間の毛管架橋力の統一的理解
3. 学会等名 粉体工学会2019年度春期研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroyuki Shinto
2. 発表標題 A Unified Understanding of Long-Range Attractive Capillary Bridge Forces between Solid Surfaces in Gas and Liquid Media
3. 学会等名 Okinawa Colloids 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 玉山泰宏
2. 発表標題 メタマテリアルによる電磁場増強とマイクロプラズマの生成
3. 学会等名 第9回光科学異分野横断萌芽研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山田涼介, 玉山泰宏
2. 発表標題 共振型メタ表面のキャパシタ構造の先鋭化によるマイクロプラズマ生成のための入射パワーしきい値の低減
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金成憲吾, 玉山泰宏
2. 発表標題 光による動的制御が可能なメタミラーを含むファブリペロー共振器を用いた電磁波の保存と放出
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Osamu Sakai, Akinori Iwai, Alexandre Bambina, Yuuki Kabe, Teruki Naito, Shigeyuki Miyagi
2. 発表標題 What We Can Learn from Hybrid Metamaterials Composed of Plasmas
3. 学会等名 The 9th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tatsuki Hangai, Manami Iga, Shigeyuki Miyagi, Osamu Sakai
2. 発表標題 Scattering of Infrared Light by Charged Microparticles with Dynamic Properties Induced by Varying Electric Fields
3. 学会等名 PIERS (Progress In Electromagnetics Research Symposium) 2018 Toyama (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuki Kabe, Syuhei Yamaguchi, Alexandre Bambina, Akinori Iwai, Shigeyuki Miyagi, Osamu Sakai
2. 発表標題 Manipulation of Microwave Propagation in and around Cylindrical Plasma with Additional Anisotropic Layers
3. 学会等名 PIERS (Progress In Electromagnetics Research Symposium) 2018 Toyama (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yasuhiro Tamayama, Osamu Sakai
2. 発表標題 Strong Enhancement of Local Electric Field and Microplasma Generation in an Electromagnetically Induced Transparency Like Metasurface
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 Akinori Iwai, Yoshihiro Nakamura, Yuki Kabe, Osamu Sakai
2. 発表標題 Propagation and Transmission of Microwaves in Negative Permittivity Plasmas Affected by Negative Permeability Metamaterials
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 Osamu Sakai, Akinori Iwai, Shinichi Sakamoto
2. 発表標題 Design of Metamaterial Effects for Transverse and Longitudinal Waves in Plasma
3. 学会等名 PIERS (Progress In Electromagnetics Research Symposium) 2018 Toyama (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuki Kabe, Akinori Iwai, Alexandre Bambina, Shigeyuki Miyagi, Osamu Sakai
2. 発表標題 Control of microwave propagation in and around cylindrical plasma with additional anisotropic layers
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 Tatsuki Hangai, Akinori Iwai, Manami Iga, Shigeyuki Miyagi, Osamu Sakai
2. 発表標題 Scattering of infrared light by charged microparticles using dynamic properties induced by varying electric fields
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 Osamu Sakai, Teruki Naito, and Go Itami
2. 発表標題 Asymmetry in metamaterial effects around real and spoof plasma frequency
3. 学会等名 The 5th A3 (China-Japan-Korea) Metamaterials Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Osamu Sakai, Keiji Sakurai, and Shigeyuki Miyagi
2. 発表標題 In-situ detection of plasma emission using in-vacuum active optical sensor
3. 学会等名 74th Annual Gaseous Electronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Osamu Sakai, Chui Inami, Yota Noyori, and Shigeyuki Miyagi
2. 発表標題 Microwave manipulation for absorption, cloaking and scattering using plasma metamaterial composite with frequency dispersion
3. 学会等名 74th Annual Gaseous Electronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 酒井道, 岩井亮憲
2. 発表標題 電磁界理論に関わる非線形現象観測の背景
3. 学会等名 電磁界理論研究会(EMT) (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiromu Yamamoto and Yasuhiro Tamayama
2. 発表標題 Controlling group delay of electromagnetic waves using Brewster metafilms
3. 学会等名 EM-NANO 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takanosuke Sato and Yasuhiro Tamayama
2. 発表標題 Microplasma generation in a meta-atom fabricated on a quartz substrate
3. 学会等名 EM-NANO 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 玉山泰宏
2. 発表標題 メタマテリアルを用いたテラヘルツ波の群遅延制御
3. 学会等名 テラヘルツ科学の最先端VIII (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤鷹之介, 玉山泰宏
2. 発表標題 メタミラーを含むファブリペロー共振器を用いたマイクロプラズマ生成
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計5件

1. 著者名 Yasutaka Mizui, Shigeyuki Miyagi, and Osamu Sakai (R. M. Benito et al. (eds.))	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Springer Nature Switzerland AG	5. 総ページ数 715
3. 書名 Complex Networks & Their Applications IX	

1. 著者名 玉山 泰宏	4. 発行年 2020年
2. 出版社 R&D支援センター	5. 総ページ数 202
3. 書名 メタマテリアル、メタサーフェスの設計・作製と応用技術	

1. 著者名 Hiroyuki Shinto, Tomonori Fukasawa (Ko Higashitani, Hisao Makino, Shuji Matsusaka (eds.))	4. 発行年 2019年
2. 出版社 CRC Press	5. 総ページ数 8 (679頁中)
3. 書名 Powder Technology Handbook, Fourth Edition	

1. 著者名 Ryota Ikai, Shigeyuki Miyagi and Osamu Sakai	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Springer International Publishing	5. 総ページ数 13
3. 書名 Complex Networks XII	

1. 著者名 玉山泰宏	4. 発行年 2022年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 7
3. 書名 メタマテリアルの設計、作製と新材料、デバイス開発への応用	

〔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
研究分担者	新戸 浩幸 (Shinto Hiroyuki) (80324656)	福岡大学・工学部・教授 (37111)	
研究分担者	玉山 泰宏 (Tamayama Yasuhiro) (50707312)	長岡技術科学大学・工学研究科・准教授 (13102)	

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		
米国	Stanford University		