

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 6日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22340171

研究課題名（和文） 負屈折率状態実現に伴う新奇プラズマ生成現象の観測と応用

研究課題名（英文） Observation and application of novel plasma phenomena induced in state of negative refractive index

研究代表者

酒井 道 (SAKAI OSAMU)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：30362445

研究成果の概要（和文）：近年注目されているメタマテリアルの概念・機能を、高密度プラズマ生成現象に応用した。負の透磁率空間をメタマテリアル構造により実現し、その空間を減圧下として数100 Wレベルのマイクロ波を入射することにより、誘電率が負となる高密度プラズマの生成と診断に成功した。誘電率と透磁率が同時に負となることで屈折率が負の空間が動的に生成され、その形成過程には強い非線形性が関与していると示唆された。すなわち、新たなプラズマ源の提案・新規の非線形メタマテリアル応用技術の実証を同時に行ったものと言える。

研究成果の概要（英文）：We applied metamaterials, whose concepts and functions have been extensively explored for these years, to high-density gas-discharge plasma generation. Negative-permeability spaces were designed and achieved by metamaterial structures, and injection of microwaves at several hundreds of watts into these spaces led to generation of high-density plasmas with negative permittivity, which was confirmed by plasma diagnostics. States with simultaneous negative permittivity and permeability led to dynamic generation of negative-refractive-index states, and generation processes were in strong nonlinear systems. This study allows us to propose novel plasma sources and to verify new techniques of nonlinear metamaterials for industrial activities.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
2011年度	7,700,000	2,310,000	10,010,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	13,100,000	3,930,000	17,040,000

研究分野： 数物系科学

科研費の分科・細目： プラズマ科学・プラズマ科学（プラズマ応用）

キーワード： プラズマ、メタマテリアル、負屈折率、直列共振、高電子密度

## 1. 研究開始当初の背景

近年、電磁的に特徴のある微細な周期構造により、巨視的パラメータとしてバルク材質を超える特性を示す「メタマテリアル」の研究が全世界的に盛んである。設計の自由度が多く保証され、また微細加工技術の進展のお

かげで、今後もその特性や応用に関して多くの新提案が期待されている。その中でも特に巨視的屈折率が負となる状態は、自然界で得られる材料あるいは人工的なバルク材質として作製可能な材料では実現不可能であり、その応用先として両面が完全にフラットな

完全レンズなどの興味深い提案がある。屈折率( $n$ )を負とするためには電磁気学における要請から誘電率( $\epsilon$ )と透磁率( $\mu$ )が  $n = \epsilon^{1/2} \mu^{1/2}$  より両方とも同時に負となる必要があり、通常は負誘電率体も負透磁率体も金属の微細構造を用いて負とする手法が取られる [例えば、R. Shelby et al., Science **292**, 77 (2001)]。

我々もすでにメタマテリアル構造により負の屈折率状態の実現に成功しているが、そこでは上記の手法とは異なり、負の誘電率状態を放電プラズマにより実現した。すなわち、プラズマの誘電率は無衝突性の場合プラズマ周波数以下で負となることが知られており、対応する電磁波の周波数帯において、金属の微細構造内のインダクタンス(L)－容量(C)直列共振現象による負の透磁率状態との重畳効果で負の屈折率状態が実現された。このようにメタマテリアルの材料としてプラズマを用いる例は世界初の成果である。

本研究において、我々はこのプラズマを利用したメタマテリアルをさらに新たな現象・応用にまで高めることを提案したい。すなわち、L-C 共振で透磁率が負となっている周波数帯の電磁波をある程度高電力状態で伝搬させ、広くはそれにより生じる非線形過程を期待する。つまり、金属の微細構造によりL-C 共振が起こっているとき、その電磁波の電力は構造部分に集中的に蓄えられる。すると、ある程度以上の局所的な電界強度となったときに、構造周囲の気体空間が絶縁破壊してプラズマ生成に至ると予想され、負の透磁率状態が負の誘電率状態を誘発する。

このようなプラズマ生成機構の研究は学術的に新規のメタマテリアル現象として独自の成果となるが、同時に技術的に非常に大きなブレークスルーを伴うプラズマ生成法となる。通常、例えば 2.45 GHz のマイクロ波を用いてプラズマを生成する場合、生成できるプラズマの電子密度は約  $10^{11} \text{ cm}^{-3}$  で頭打ちとなる。これは電磁波の伝搬が、その周波数がプラズマ周波数(電子密度の関数)と一致するとき遮断条件となることに由来し、高電子密度のプラズマを得るための本質的な障害となっていた。最近提案されている表面波によるプラズマ生成などの手法はこの条件を多少緩和するが、本質的な解決には至らない。さらに詳細に述べると、その遮断条件とは誘電率が正から負に変わる境界であり、通常は透磁率が正であるため屈折率が実数から虚数となることで伝搬不可能となる。それに対して、本プラズマ生成法によると、通常の状態とは正反対に電磁波の入射・プラズマ生成により従来の遮断密度以上で制限無く電子密度を高めることが可能となる。

## 2. 研究の目的

本研究では、高出力の電磁波入射下で、L-C 直列共振構造のアレイ構造においてプラズマ生成と負の屈折率状態を同時に実現し、その診断とプロセス装置としての応用を検討する。より詳しくは、L-C 直列共振構造は金属の微細な周期構造体よりなり、そこに共振周波数にほぼ一致する周波数の電磁波(本研究ではマイクロ波)を入射する。電磁波が照射される前面にはエネルギーが集中し、かつそのアレイ構造は巨視的透磁率を負とし、屈折率は虚数となっている。閾値を超えた電磁波エネルギーは各構造部でプラズマを生成し、エネルギーが高まることで電磁波周波数での誘電率が負となる。すると、その周辺一体での巨視的屈折率は実数(負)となり、電磁波は構造体内での伝搬を開始し、次々と空間各部でプラズマを生成し屈折率を負としながら進行する(図1)。結果として、遮断密度を大きく超える高密度プラズマが生成すると予想される。すなわち、下記のような具体的な目的を掲げて研究を行う。

- (1) L-C 共振構造の設計およびプラズマ生成の実証
- (2) プラズマパラメータ分布の診断
- (3) 電子レンジ型バッチプロセス装置の開発

## 3. 研究の方法

本研究における、負屈折率体の新規現象の解明、および新規プラズマ生成法の確立を目指し、以下の具体的内容を実施する。

まず“L-C 共振構造の設計およびプラズマ生成の実証”を行い、L-C 共振構造の設計・作製を行った後、そのアレイ構造を真空チャンバーに設置し、大気圧からその 1/100 程度の圧力範囲でのプラズマ生成の様子を観測する。同時に、VNA(ベクトルネットワークアナライザ)測定により構造体全体の巨視的屈折率を導出する。次に、プラズマパラメータ分布の診断を行うため、微視的パラメータ分布の測定を可動型プローブと新規のレーザ吸収分光法により行い、巨視的屈折率と微視的電子密度分布の対応付けを行う。最後に応用として、“電子レンジ型バッチプロセス装置の開発”を行い、市販の電子レンジに廉価な構造体を設置するだけで大気圧プラズマを生成する方法を確立する。

## 4. 研究成果

- (1) L-C 共振構造の設計およびプラズマ生成の実証

通常メタマテリアル研究においては、電磁波の電力が小さく、電磁波の伝搬による媒質の変化が無視できる状態を扱っている。逸れに対し、本研究では、伝搬する電磁波の電力が高くなって線形近似が成り立たないと

きにどのような現象が生じるか、という観点で研究を行った。つまり、電磁波のエネルギーが高くなると、主にはその電界成分によりプラズマ密度が増加することが考えられ、そうすると誘電率の変化を通して電磁波伝搬の様子が変化する。この変化によりまたプラズマ密度の変化と誘電率の変化が生じる。このような非線形過程がどのような機構で生じるかを、理論と実験の両面で調べた。

まず、理論的には、2次元有限サイズの負の透磁率空間に対して数値計算で電磁波の伝搬の様子を調べ、その電界強度により空間の電離係数が決まり、さらに電離に伴うプラズマ生成で空間の誘電率が変化して、電磁波の伝搬へ影響を及ぼす、という系を仮定した。解析過程において、電磁波伝搬に関する数値計算とプラズマの粒子バランスに対する理論計算から誘電率が別々に求められるので、その誘電率が等しくなる値を初期電界強度にたいしてプロットした。結果として、図2のような分岐図 (bifurcation diagram) が得られた。負の透磁率空間の中心部においては、点Aと点Bが分岐点となるサドルノード分岐現象を示す。すなわち、左側から電磁波の電界が増加していくとき、点Bを越えないとプラズマ生成（この場合、それは負の誘電率状態に等価）が生じない。一方、負の透磁率空間の端部においてはほぼ線形に誘電率が変化していく。この影響は大きく、もし端部からプラズマ生成が始まれば、負の透磁率空間の屈折率は虚数から実数（負）に変化して電磁波伝搬を許すようになる。すると電磁波は徐々に中心部に浸出する。つまり、端部における位相図 (phase portrait) に従い、サドルノードの安定枝間を“トンネル現象”のように動作点が変わると考えられる。

一方、実験検討としては、負の透磁率空間を2重分割リング共振器 (DSRR) アレイの積層構造により実現し、そこに 2.45 GHz・数 100 W のマイクロ波を入射した。より詳細には、図3に示すように、構造全体を導波管ごと真空チャンバーの中に設置し、その前後に方向性結合器を設置して入射・反射・透過電力を観測した。すると、図3に示すように、まず DSRR アレイの内部にてプラズマ生成を意味する明るいプラズマからの発光がほぼ均一に観測された。また、プラズマ生成に伴い、反射電力が減少すると共に透過電力が増大した。通常のプラズマ生成の場合は、プラズマ生成に伴って電磁波がプラズマにより吸収され、透過する電磁波量は減少するはずだが、それとは逆の結果である。これは、図1で予想したように、負の透磁率空間の屈折率が、虚数であった状態から実数へ変化したことを示唆しており、屈折率が負となっていると推測される。

## (2) プラズマパラメータ分布の診断

上記のように生成されたプラズマについて、マイクロ波の透過信号の上昇から推測すると誘電率が負の高密度プラズマとなっていることが予測されるが、実際にプラズマパラメータの時空間分布を測定して確認を行った。

まず、可動ラングミュアプローブを利用して、電子密度の空間分布とその時間変化を測定した。図4に示すように、マイクロ波入射電力の増加と、入射面 ( $z = 0$  mm) 近傍の電子密度の上昇傾向は、よく対応している。そして、入射面から 15 mm の部分までは誘電率が負の状態となっていることがわかる。また、電力投入量と電子密度の関係をみると、0.3 ms 以前の低電力・低密度状態と、0.4 ms 以後の大電力・高密度状態は、明らかに異なるモード状態にあることが示唆され、それは図2等で説明した非線形分岐現象が現れているものと推定される。

また、新規の測定法として、光周波数コム型レーザ光を用いた新規測定法の提案も行った。マイクロ波プラズマ生成に用いた Ar ガスの準安定励起原子について、高周波放電においてその吸収スペクトルの測定を行うため、光周波数コム型レーザ光をデジタル化されたコヒーレント光、単一波長レーザをアンカー役のレーザ光として、両者のビート波を観測することで広がりを持つ吸収スペクトルを一括測定することに成功した。実際に以上に述べたようなマイクロ波生成プラズマに対して測定法を適用するところまでは至らなかったが、その有用性を示すことができたと考えている。

## (3) 電子レンジ型バッチプロセス装置の開発

実際の応用形態として、真空チャンバー内のマイクロ波高密度プラズマ源は産業応用において重要と考えられるが、一方でさらにこのプラズマ源を様々な分野に応用するため、電子レンジ型バッチプロセス装置を開発した。

ここでは、大気圧のアルゴンガス内でマイクロ波プラズマを生成するため、市販の電子レンジ内に、上記(2)で用いたのと同様の負の透磁率のメタマテリアル構造を設置し、そこに大気圧アルゴンガスを封入した容器を挿入した。すると、数 100 W の投入電力に対し、不均一ではあるがマイクロ波の大気圧プラズマ生成に成功した。より構造などを最適化することで、電子レンジという容易に入手可能なツールにより大気圧マイクロ波プラズマが利用可能となると推測される。

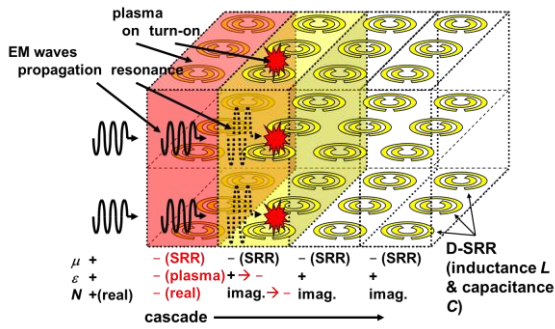


図1. 本研究で目指す高密度（負誘電率）プラズマ生成の概念図。DSRR アレイが透磁率を負とし、生成プラズマ部が誘電率を負とし、結果として空間の屈折率が負となる。電磁波の伝搬と高密度プラズマが同時進行する。

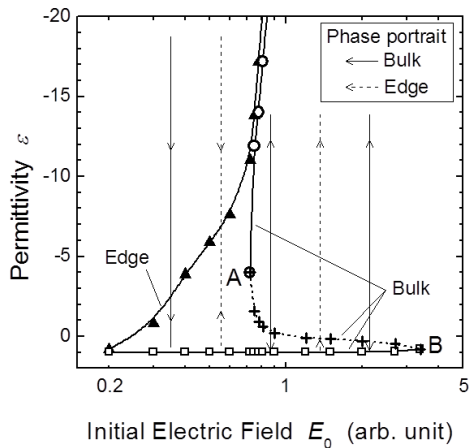


図2. プラズマ部の誘電率を初期（入射）電界密度の関数で表したときの、非線形現象を表現する分図。

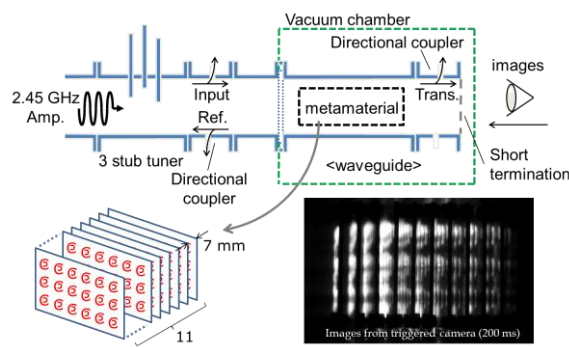


図3. 実際の実験における装置構成とメタマテリアル構造。右下に、メタマテリアル部で観測された可視発光像を示す。

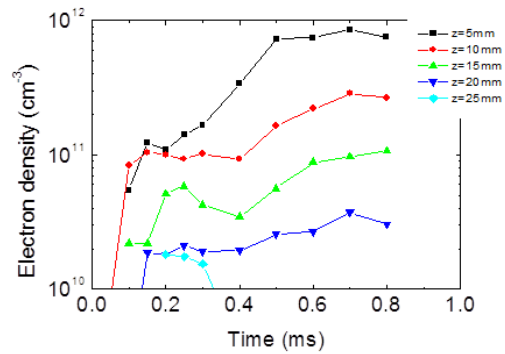
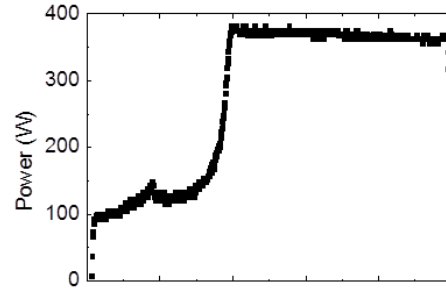


図4. マイクロ波（2.45 GHz）の入射電力および各箇所での電子密度の時間発展波形。

## 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計4件）

- ① O. Sakai, T. Shimomura and K. Tachibana, "Negative refractive index designed in a periodic composite of lossy microplasmas and microresonators," *Physics of Plasmas*, 査読有, vol. 17, 2010, pp. 123504-1-9.
- ② O. Sakai, S. Iio, T. Shimomura and K. Tachibana, "Experimental and theoretical characterization of plasma metamaterials," *Transactions of the Materials Research Society of Japan*, 査読有, vol. 39, 2011, pp. 449-454.
- ③ O. Sakai and K. Tachibana, "Plasmas as metamaterials: a review," *Plasma Sources Science and Technology*, 査読有, vol. 21, 2012, pp. 013001-1-18.
- ④ K. Urabe and O. Sakai, "Absorption spectroscopy using interference between optical frequency comb and single-wavelength laser," *Applied Physics Letters*, 査読有, vol. 101, 2012, pp. 051105-1-4.

〔学会発表〕（計9件）

- ① O. Sakai, and T. Shimomura, "Anomalous response of lossy plasmas immersed in

metamaterial structure in the microwave range," *The 63th Gaseous Electronic Conference and 7th International Conference on Reactive Plasmas* (Paris, France, October 4-8, 2010) (*Abstracts*, p. 45).

② O. Sakai and S. Iio, "Bifurcated permittivity in a field-dependent metamaterial via discharge plasma generation," *The Progress in Electromagnetics Research Symposium 2011* (Marrakesh, Morocco, March 20-23, 2011) (*Abstracts*, p. 26).

③ 酒井道 他、「実験及び理論解析によるプラズマメタマテリアルの特性評価」(招待講演)、第20回日本MRS学術シンポジウム(横浜、2010年12月20日)。

④ O. Sakai, S. Iio, K. Imanaka and K. Urabe, "Plasma generation via propagating waves in metamaterial structure," *6th International Workshop on Microplasmas* (Paris, France, April 3-6, 2011) (*Abstracts*, p. 48).

⑤ O. Sakai, "Emerging aspects in a plasma-metamaterial composite," *XXX General Assembly and Scientific Symposium of International Union of Radio Science* (Istanbul, Turkey, August 13-20, 2011) (*Abstracts*, p. 64).

⑥ O. Sakai and D.-S. Lee, "Deformation of surface waves propagating on 2-dimensional metamaterial structure," *The Progress in Electromagnetics Research Symposium 2012* (Kuala Lumpur, Malaysia, March 27-30, 2012) (*Abstracts*, p. 67).

⑦ O. Sakai, "Tunable and nonlinear metamaterials activated by gas-discharge plasmas," *The 2nd Japan-Korea Metamaterials Forum* (Tsukuba, Japan, June 28-30, 2012) (*Abstracts*, pp. 42-43).

⑧ O. Sakai, "Plasma metamaterials for novel interaction between plasmas and waves," *The 39th IEEE International Conference on Plasma Science* (Edinburgh, Scotland, July 8-12, 2012) (*Abstracts*, p. 118).

⑨ O. Sakai Y. Nakamura and S. Iio, "Transition to negative refractive index in plasma metamaterial with negative permeability," *Proceedings of The Sixth International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics (Metamaterials' 2012)* (St. Petersburg, Russia, September 17-22, 2012) (in CD-ROM).

[図書] (計2件)

① Osamu Sakai, Intech (Rijeka), "Propagation of electromagnetic waves in and around plasmas," in *Wave Propagation*, edited by A. Petrin, 2011, pp. 331-352.

② 酒井道 他、シーエムシー出版(東京)、「メタマテリアルII」、2012、pp. 89-98。

[その他]

ホームページ

[http://plasma1.kuee.kyoto-u.ac.jp/osaka\\_i/](http://plasma1.kuee.kyoto-u.ac.jp/osaka_i/)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

酒井道 (SAKAI OSAMU)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：30362445

### (2) 研究分担者 該当無し

### (3) 連携研究者 該当無し