

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：14301

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2010～2014

課題番号：22109004

研究課題名（和文）構造共鳴を利用したマイクロ波の偏光および伝播制御

研究課題名（英文）Control of polarization and propagation of microwave using structural resonance

研究代表者

北野 正雄（Kitano, Masao）

京都大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：70115830

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 85,400,000 円

研究成果の概要（和文）：旋光性媒質での無反射現象、自己補対メタ表面での周波数無依存応答など新たな概念を提案した。また、結合共振型メタ材料の応用として、電磁波の保存/再生や第2次高調波の高効率発生にも成功した。気体プラズマを導入したメタ材料の検討において、動的負屈折率状態と非線形性増強効果（非線形動力的分岐現象と高調波生成）を確認した。電磁界解析を基にした遺伝アルゴリズムにより、位相特性を制御する任意形状メタ材料素子を開発し、数値的・実験的に妥当性を検証した。電磁場の基本式から系統的に回路モデルを導き、複雑な導体構造における現象を見通しよく表現する手法を与えた。

研究成果の概要（英文）：We have proposed new concepts such as no-reflection condition for chiral medium and frequency-independent response of self-complementary meta-surface. We have demonstrated storage of electromagnetic waves and enhancement of second harmonic generation with coupled-resonator-based metamaterials. In the analysis of plasma metamaterials, we have confirmed dynamic negative-refractive-index and nonlinearity enhancement (bifurcation and harmonic generation). Metamaterials with arbitrarily shaped elements have been proposed and developed by using the genetic algorithm based on the electromagnetic field analysis. The proposed methods have been verified numerically and experimentally. We theoretically derived circuit models for metallic structures from Maxwell equation. They give us physical insights of electromagnetic phenomena in metamaterials.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：メタ材料 マイクロ波 群速度制御 非線形効果 プラズマ 最適化設計 任意形状素子 回路モデル

### 1. 研究開始当初の背景

メタマテリアルを用いた新現象の提案として、特定の円偏光に対して媒質が真空としてふるまうカイラル真空の概念を提案していた。

結合共振型のメタマテリアルにおいて、電磁誘起透明化現象(以下 EIT 現象)を実現する方法に関して研究を開始していた。当時は、メタマテリアルの特性を制御する方法は研究されておらず、電磁波の保存と再生に関しても研究されていなかった。

気体プラズマをメタマテリアルの構造として利用するという独自の研究は、プラズマの誘電率が複素平面上で実部が負の値を含んで可変性を示すことから計画された。このような極めて連続的で広範囲の誘電率制御が可能なプラズマならではの特性と言える。伝搬マイクロ波とプラズマ生成用電力を別とすることで精密な誘電率制御を行うことが期待できるが、一方で伝搬マイクロ波そのものによる気体プラズマ生成を行うと、金属や誘電体では実現できない強い非線形性を実現するものと予測した。

電磁界解析を基にした遺伝的アルゴリズム(GA)による設計によって、これまで UWB 用帯域通過フィルタの小型化、ならびに広帯域周波数選択膜(FSS)の薄型化等の開発を行ってきており、単純な構造から非常に複雑な任意形状に至るまで、広範囲な設計パラメータを扱う形状最適化手法について検討してきた。GA をメタマテリアルの設計に応用すれば、メタマテリアルの動作原理の解明や新たな素子モデル構築が期待できる。

回路モデルは電磁現象の直感的な理解に有効であるため、メタマテリアルのモデルとしてもよく用いられる。しかし研究開発当初の回路モデルは、直感的な解釈に基づいて構成されていたため、正確な電磁現象の記述は難しく、定量的な評価のためには電磁界解析が必要であった。一方、電磁界解析は複雑で大規模な導体構造における電磁現象の解析には計算コストが大きいと同時に、現象の解釈に対しては直感に頼る要素があった。

### 2. 研究の目的

カイラル真空以外にも新たな電磁応答を実現するメタマテリアルを提案し、実験で実証することが大きな目標の一つである。

結合共振型のメタマテリアルにおいては、単一共振メタマテリアルを超えた機能が期待できる。特に、EIT 現象を模擬するメタマテリアルでは非線形効果の増強や電磁波の低速化および保存が期待できる。共振モードを結合させる方法に関しても従来の近接場による結合以外の方法を提案する。

メタマテリアル(の一部)に気体プラズマを導入し、プラズマのパラメータ可変性と動的性質を活かしたメタマテリアルの実現に取り組むこととした。まず、プラズマによる動的メタマテリアルの実現を目指した。ここでは

プラズマの動的な負の誘電率の実現による動的な負の屈折率状態の生成を屈折率の複素数平面上での制御を行うことを目指した。次に、メタマテリアル中における局所電磁場を利用した非線形性の増強を試みた。伝搬マイクロ波の共振構造部における局所電磁場によるプラズマ生成、非線形応答の実現と、自己組織的なプラズマ形状形成の確認を行うこととした。

高精度でかつ高速な計算が行える電磁界解析技術を基に GA によるメタマテリアル設計を行い、任意形状素子からなるメタマテリアル回路素子、メタマテリアル・サーフェス、ならびに放射系の構成法を明らかにし、新たな単位セル形状を提案していく。そして、伝送特性ならびに放射特性の高性能化が行える効率的なメタマテリアル設計手法の確立を目指していく。

複雑な導体構造から成るメタマテリアルにおける電磁現象を正確に記述し、かつその現象の仕組みを明確化できるモデルとして回路モデルの作成手法を開発することを研究の目的とした。そのためには従来の回路モデル導出における直感的な要素を排除し、Maxwell 方程式から系統的にモデル構築を行う手法を与える一方で、電磁界解析と比べて計算コストを大幅に削減し、直感に頼らない現象解釈が可能なモデル構築を目指した。

### 3. 研究の方法

真空と一般の旋光性媒質との境界での反射現象を詳細に解析し、ブリュースター現象の一般化を考察する。これに加え、メタ表面における反射/透過/吸収に関して新たな物理現象を探索する。

結合共振型メタマテリアルに関しては、電磁波の保存と再生に不可欠な特性制御可能な EIT メタマテリアルを提案する。そのために、バラクタダイオードと呼ばれる可変容量素子を導入する。また、この素子は、入力信号の周波数混合にも利用できる。この特性を、第 2 次高調波発生の高効率化に利用する。

パラメータ(特に誘電率)を細かく制御できるプラズマ媒質を利用してパラメータを精緻に変化させるため、まず対象とするマイクロ波とプラズマ生成用電力を別々に設定して実験した。この結果を用いることにより、誘電率-透磁率平面で電磁波の動作点を動かすことができ、多くの興味深い現象が実現可能となると予想した。次に、大電力のマイクロ波を入射して負屈折率領域のなだれ状の発生を実現し、強い非線形状態を実現した。透磁率の制御は、多重らせん構造あるいは 2 重分割リング共振器構造を用いて行った。

モーメント法を基にした GA による最適化によって、微小導体セルによって構成した単位セル構造を決定し、メタマテリアル・サーフェスおよびメタマテリアル線路素子の位相特性、減衰特性、漏えい特性、および反射特性の制御について検討する。そして、広

帯域化・低損失化を図っていく。さらに、マイクロ波回路・アンテナへの応用についても検討を加え、その有効性を確認する数値実験ならびに試作実験を行う。

研究開始当初に電磁現象の明確化のために扱っていたモデルとして単導体素子モデルがあった。これはメタマテリアルのような明示的な帰路線をもたない導体構造に対して電磁現象を表現するモデルであった。そこで、このモデルに基づいて、Maxwell 方程式から系統だてて回路モデルを導出可能なモデルとして、集中・分布定数の両回路モデルを構成するとともに、よりマクロな回路モデルの構築を目指した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 旋光性媒質界面での無反射現象

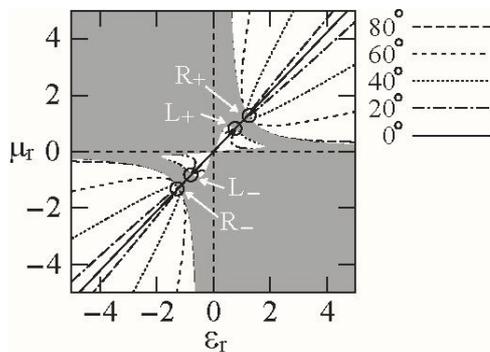


図1 無反射角の等高線.  $R_+$ ,  $L_+$  ( $R_-$ ,  $L_-$ )はそれぞれ、屈折率が正(負)の場合の、右円偏光および左円偏光に対する無反射条件に対応する。灰色領域には無反射条件は存在しない

真空から旋光性媒質へ電磁波が入射する場合の無反射現象について詳しく解析した図1はカイラリティーパラメータを固定して、比誘電率  $\epsilon_r$  と比透磁率  $\mu_r$  を変化させたときの無反射角を表したものである。無反射角の等高線が交わる点が円偏光に対する無反射条件に対応し、任意の入射角に対して無反射となることを表している。カイラリティーパラメータが0であると、任意の入射角に対して無反射となるのは真空と反真空のみである。ところが、カイラリティーが存在することによって、右円偏光あるいは左円偏光の一方に対して、旋光性媒質が真空および反真空のようにふるまうような条件が現れるのである。また、比誘電率の1からのずれが比透磁率の1からのずれよりも大きい(小さい)領域ではTM-like (TE-like) な楕円偏光に対して無反射になることが明らかになった。これらの成果は、任意の偏光に対する無反射窓の作製に応用できるものである。

##### (2) 自己補対メタ表面の周波数無依存応答

拡張したバビネの原理をメタ表面に適用することで、通常共振的な周波数応答が特定の条件(自己補対条件)で打ち消され周波数によらない電磁波応答が得られることを理

論的に示した。この特性を検証するために図2のような抵抗膜(Ti)を導入したチェッカーボード型メタ表面を作成し、テラヘルツ領域で透過測定を行った。測定結果の解析により自己補対条件を満たすときに、電磁応答が周波数無依存になることを実証した。

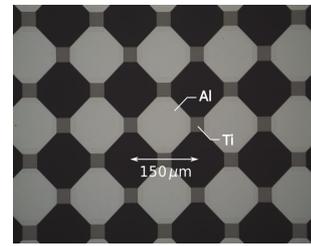


図2 自己補対メタ表面

##### (3) 電磁波の保存および再生

電磁誘起透明化現象(EIT 現象)は元々原子系で研究されてきた現象で、これを用いることで電磁波を媒質中に停止(保存)したり、再発進(再生)したりすることができる。人工原子系ともいえるメタマテリアルを用いて同種の効果を実現する方法は研究されているが、電磁波の保存/再生を実現する方法は考案されていなかった。そこで、我々は、図3(a)のような可変容量素子( $C_1, C_2$ )を導入したメタマテリアルを考案し、電磁波の保存と再生を始めて実現した。図3(b)のように、EIT 現象が無効化(EIT OFF)の期間だけ電磁波が保存され、再度有効化(EIT ON)すると保存されていた電磁波が再生される。EIT 現象を模倣する方法はこれ以外にも、電場の勾配でEIT 現象を誘起する方法や、間接結合で実現する方法なども考案した。また、EIT 現象とは別に、非線形効果で共振器結合を実現する方法を考案し、第2次高調波発生の高効率化にも成功している。

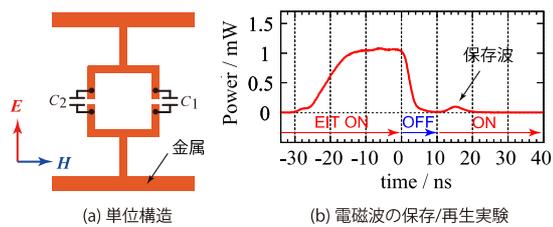


図3 (a)単位構造 (b)電磁波の保存/再生実験

(4) 気体プラズマを導入したメタマテリアルマイクロ波帯における気体プラズマを導入したメタマテリアルの検討においては、プラズマの誘電率が正(+1)から負の値へ、そして透磁率を通常の導体のメタマテリアルにより負の値に制御することで、負屈折率体等として現れる現象とその機構を明らかにした。プラズマの誘電率がプラズマ生成電力により変化できる点、それからマイクロ波そのものを高電力としてそれによるプラズマ生成を考える点、以上2点は、これまでのメタマテリアル研究には無い、可変性と非線形性を付与するものとなった。

負屈折率体可変性を実証する実験においては、透磁率制御を金属細線の2重らせん構

造を用いて行った。外部電力としての低周波電界によりプラズマ生成を行うことで誘電率の値は有意に変化し、結果として屈折率は-2から正の値(ほぼ+1)にまで連続的に変化することが確認された。この成果は、プラズマの誘電率の虚部をプラズマ生成気体の圧力を変化させることで制御させることで、可変位相器と可変減衰器の混成機能を示すことが実験的に確認できた。

また、大電力マイクロ波を用いる非線形性に関わる実験においては、透磁率の制御として2重分割リング共振器を用いた。プラズマ生成は、マイクロ波電力が一定の閾値を迎えると一気に進行して負の誘電率値にまで達し、また逆にプラズマ生成状態から電力を低下させると誘電率がゼロとなる付近でプラズマが消滅して誘電率が+1となった。この現象は、当初予測していたように、伝搬マイクロ波と屈折率係が自己組織的に決定されるモデルが正しいことを強く示唆した。理論モデルを構築して非線形動的に調べたところ、確かに系は双安定状態を示しうるサドルノード分岐現象であることがわかった。また、別の非線形性として、2倍高調波発生の確認にも成功し、これは2倍高調波に対して屈折率がゼロに近いところで高効率化することが確認された。この現象は、プラズマ・メタマテリアル複合体が持つ非線形性とプラズマの誘電率の高制御性が融合した形で実現したものと考えられる。

#### (5) 遺伝的アルゴリズムによる設計

反射位相制御のためのメタマテリアル・サーフェスを開発するため、多数の微小方形ストリップ導体から構成される単位セルの2次元配列を考え、周期境界条件を用いたスペクトル領域モーメント法を基にした形状最適化を行った。そして、導体ストリップ上の誘起電流によって生じる交差偏波成分を低減させるとともに入射偏波による特性の差異を十分小さくするため、直交する2軸の対称性をもたせた単位セル形状によって偏波特性をそろえ、さらに45度の軸に対しても対称性をもたせることで放射電界の交差偏波成分をキャンセルできることを見出している。また、任意形状単位セルの周波数依存性の制御や、隣接単位セル間の相互結合の影響を考慮した設計法を提案し、最適化した周波数範囲において所定の左手系媒質の特性が得られることを確認した。そして、開発したメタマテリアル・サーフェスを基にして開口面アンテナを設計し、試作実験によって本法の有用性を明らかにした。

位相定数制御のためのメタマテリアル平面回路線路を開発するため、GAにモーメント法(MoM)を組み込んだGA/MoM最適化において、新たに数値的TRL校正ならびに周期境界条件を適用して最適化の評価関数を定義し、高性能化を図った。さらに伝送特性を向上させるため、単位セル間の高次モード

の影響を考慮した設計解析法を提案し、試作評価によって、提案する方法の妥当性を検証するとともに、本法によって良好な位相特性が得られることを明らかにした。

また、位相定数制御のためのメタマテリアル方形導波管を開発するため、任意形状導体パッチ素子によって構成した3層FSSを単位セルとして周期的に積層する構成法について検討を加えた。ここでは、基本モードと高次モードを考慮したスペクトル領域グリーン関数を用いたモーメント法による解析を行い、各層のFSSを近接配置した構造における一般化散乱行列を用いた厳密な取り扱いと周期境界条件を考慮した単位セルの分散特性の評価を基に動作周波数範囲の広帯域化を図った。特に、遮断高次モードの影響については厳密な解析評価が不可欠であり、十分な計算精度で効率的に最適化が行える方法を提案している。そして、X帯における伝送特性について数値シミュレーションならびに試作実験の両面から詳細に評価し、希望の位相特性が得られるとともに、阻止域特性の制御も容易に行えることを明らかにした。

さらに、右手/左手系複合導波管の新たな構成として、円形導波管にリッジを周期配置する構成を提案し、同軸TEMモード励振において伝送特性ならびに漏えい特性を広帯域に制御する方法を開発した。そして、管壁にスリットを設けることでアンテナとして良好な放射特性が得られることも確認した。

#### (6) メタマテリアルの回路モデル化

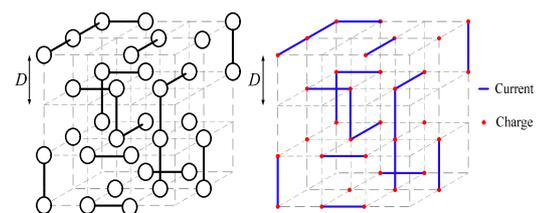


図4 導体球と導体線からなるモデル

単導体素子モデルを元に、集中定数回路によってモデル化するために適した導体構造として、図4左のような導体球と導体線からなる構造を考え、Maxwell方程式から系統だっ回路モデルを導出する方法を開発した。この方法では同図右に示すように導体球に電荷、導体線に電流が存在するモデルとなり、導体線と等しいトポロジーの回路モデルが得られるため、現象の解釈が容易になる。また、得られた回路のモード解析を行うことにより、振動モードや共振周波数などを定量的に求めることができる。

実際にC型の導体構造のメタ原子に対して提案回路モデルと電磁界解析の比較を行ったものを図5に示す。回路モデルでは3自由度の常微分方程式を解くだけで電磁界解析と近い特性が得られていることがわかる。

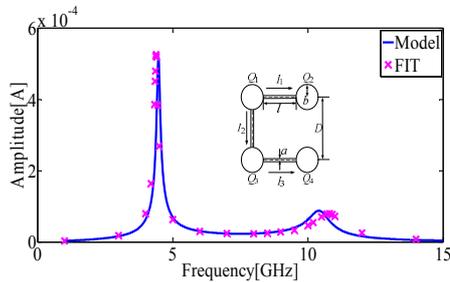


図5 C型導体構造の解析

また、メタマテリアルと外部との結合に関して、放射を表現するモデルとして、当初は放射抵抗を用いたが、新たに遅延を含む回路素子を導入し、外部との結合を物理的に適切な形で評価できることを示した。

一方で、単導体素子モデルをマクロ化した分布定数回路モデルとして単導体線路モデルを提案した。これは導体線を分割してモデル化した単導体素子に対して線全体を1つの線路として扱うよりマクロなモデルである。単導体線路は明示的な帰路線をもたないため、通常回路変数として用いる電圧という物理量を使うことが難しいが、線電荷密度と電流を変数とする分布定数線路として定式化することにより、Maxwell方程式から系統的に導出できることを示した。

また、このモデルに対して、外部との結合である放射の反作用のモデル化を行った。これは、有限長単導体線路の端部の影響が遅延を伴って自己誘導を生成するモデルを用いることによって、放射の反作用である伝搬電流の減衰を表現する回路モデルである。

このように複雑な導体構造における電磁現象に対する回路モデルとして、集中・分布定数回路について、Maxwell方程式から系統的に回路モデルを導出する手法を確立し、電磁界解析と比べて計算コストを大幅に抑え、直感的かつ定量的な電磁現象の理解を可能にするモデルが得られたと言える。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計30件)

Y. Urade, Y. Nakata, T. Nakanishi, and M. Kitano, "Frequency-independent response of self-complementary checkerboard screens," *Phys. Rev. Lett.* Vol. 114, p. 237401 (2015), DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.237401. 査読有

Y. Tamayama, "Brewster effect in metafilms composed of bi-anisotropic split-ring resonators," *Opt. Lett.* Vol. 40, pp. 1382-1385 (2015), DOI: 10.1364/OL.40.001382. 査読有

Y. Tamayama, K. Yasui, T. Nakanishi, and M. Kitano, "Electromagnetically induced transparency like transmission in a metamaterial composed of cut-wire pairs with indirect coupling," *Phys. Rev. B*, Vol. 89, p. 075120 (2014), DOI: 10.1103/PhysRevB.89.075120. 査読有

Y. Mukainoge, H. Deguchi, M. Tsuji, "An optimized design method of composite right/left handed transmission lines considering higher-order mode interaction by genetic algorithm," *IEEE International Workshop on Electromagnetics Proceedings*, Vol. 1, pp. 78-79 (2014). DOI: 10.1109/iWEM.2014.6963644. 査読有

T. Nakanishi, T. Otani, Y. Tamayama, and M. Kitano, "Storage of electromagnetic waves in a metamaterial that mimics electromagnetically induced transparency," *Phys. Rev. B*, Vol. 87, p. 161110 (2013). DOI:

10.1103/PhysRevB.87.161110. 査読有.

T. Nakanishi, Y. Tamayama, and M. Kitano, "Efficient second harmonic generation in a metamaterial with two resonant modes coupled through two varactor diodes," *Appl. Phys. Lett.* Vol. 100, p. 044103 (2012). DOI:

10.1063/1.3679652. 査読有.

O. Sakai and K. Tachibana, "Plasmas as metamaterials: a review," *Plasma Sources Science and Technology*, Vol. 21, pp. 013001-1-18 (2012).

DOI:10.1088/0963-0252/21/1/013001. 査読有.

Y. Aoki, H. Deguchi, M. Tsuji, "Reflectarray with arbitrarily-shaped conductive elements optimized by genetic algorithm," *IEEE/AP-S Antennas and Propagation Symposium Proceedings*, Vol. 1, pp. 960-963 (2011). DOI: 10.1109/APS.2011.5996437. 査読有

O. Sakai, "Transition between positive and negative permittivity in field-dependent metamaterial," *Journal of Applied Physics*, Vol. 109, pp. 084914-1-6 (2011).

DOI:10.1063/1.3574921. 査読有.

O. Sakai, T. Shimomura and K. Tachibana, "Negative refractive index designed in a periodic composite of lossy microplasmas and microresonators," *Physics of Plasmas*, Vol. 17, 2010, pp. 123504-1-9 (2010). DOI:

10.1063/1.3524561. 査読有.

〔学会発表〕(計96件)

T. Nakanishi, "Storage and manipulation of electromagnetic waves in metamaterials," *EMN Fall Meeting*, Orlando, USA, Nov. 22 (2014).

Y. Tamayama, K. Yasui, T. Nakanishi, and M. Kitano, "Modulation instability in a metamaterial waveguide with third-order nonlinearity," *International Conference on Computational & Experimental Engineering and Science 2014*, Changwon, Korea, Jun. 13 (2014).

Y. Urade, Y. Nakata, T. Nakanishi, and M. Kitano, "Experimental Study on Frequency-independent Response of Self-complementary Metasurfaces in Terahertz Regime," *8th Int. Congr. Adv. Electromagn. Mater. Microw. Opt.* Copenhagen, Denmark, Aug. 25 (2014).

西村茂幸、出口博之、辻 幹男「リッジを部分的装荷した右手左手系複合円筒導波管の一検討」電子情報通信学会技研報告、MW2014-177、159-164、2014年12月19日、青山学院大学(東京都渋谷区)

Osamu Sakai, "Plasmas, metamaterials, and their functional composites," Japan-Australia Commemorative Workshop, Canberra, Australia, Jun. 23-25 (2013)

T. Hisakado, "Equivalent Circuit Model with External Coupling for Metamaterials Composed of Wired Metallic Spheres," 7th Int. Congr. Adv. Electromagn. Mater. Microw. Bordeaux, France, Sep. 19 (2013).

麻田智也、出口博之、辻 幹男「低交差偏波特性を有する任意形状素子により構成されたリフレクタレー」電子情報通信学会ソサイエティ大会、B-1-121、2013年9月19日、福岡工業大学(福岡市)。

K. Yoshida, "Resonant mode analysis of metamaterials composed of conducting spheres and wires by equivalent circuit model," 6th Int. Congr. Adv. Electromagn. Mater. Microw. St. Petersburg, Russia, Sep. 17 (2012).

Osamu Sakai, "Plasma metamaterials for novel interaction between plasmas and waves," The 39th IEEE International Conference on Plasma Science, Edinburgh, UK, Jul. 8-12 (2012).

Osamu Sakai, "Novel functional composites of plasmas and metamaterials," The 54th Annual Meeting of the American Physical Society Division of Plasma Physics, Providence, USA, Oct. 29-Nov. 2 (2012).

出口博之「電磁界数値解析を基にした回路素子及び開口面アンテナの形状最適化技術」IEEE MTT-S Kansai Chapter Workshop, 2012年7月28日、京都工芸繊維大学(京都市)。

〔図書〕(計6件)

M. Kitano, Intech, Trends in Electromagnetism - From Fundamentals to Applications, pp. 21-44 (2012).

出口博之、辻 幹男、シーエムシー出版「メタマテリアルII, 第17章 導体基板付きコプレーナ線路を基にした右手/左手系複合伝送線路と漏洩波アンテナへの応用」pp. 176-190 (2012)(分担執筆)。

Y. Tamayama, T. Nakanishi, K. Sugiyama, M. Kitano, Intech, Wave Propagation, pp. 415-432 (2011).

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

北野正雄、中西俊博、シーエムシー出版、フォトニックナノ構造の最近の進展、pp. 268-276(2011)。

〔その他〕

ホームページ

京都大学(北野正雄、中西俊博)

<http://www-lab15.kuee.kyoto-u.ac.jp/index.php?id=25>

同志社大学(出口博之)

[https://www1.doshisha.ac.jp/~hdeguchi/h\\_research.html](https://www1.doshisha.ac.jp/~hdeguchi/h_research.html)

長岡技術科学大学(玉山泰宏)

<http://kyasuiweb.nagaokaut.ac.jp/tamayama/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

北野 正雄 (KITANO, Masao)

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：70115830

### (2) 研究分担者

出口 博之 (DEGUCHI, Hiroyuki)

同志社大学・理工学部・教授

研究者番号：80329953

### (3) 研究分担者

酒井 道 (SAKAI, Osamu)

滋賀県立大学・工学部・教授

研究者番号：30362445

### (4) 研究分担者

久門 尚史 (HISAKADO, Takashi)

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：80301240

### (5) 研究分担者

中西 俊博 (NAKANISHI, Toshihiro)

京都大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：30362461

### (6) 研究分担者

玉山 泰宏 (TAMAYAMA, Yasuhiro)

長岡技術科学大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：50707312