

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月24日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2018

課題番号：17K18880

研究課題名（和文）メタ表面によるエバネセント波の生成と制御

研究課題名（英文）Evanescent wave generation and control by metasurfaces

研究代表者

真田 篤志（Sanada, Atsushi）

大阪大学・基礎工学研究科・教授

研究者番号：20264905

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）：本研究では、エバネセント波を生成・操作し回折限界を超える波長以下の結像を広帯域に実現する人工構造表面（メタ表面）の構成理論を構築した。その際、一般には実数となる自由空間の波動インピーダンスが、エバネセント波の生成に伴い虚部を持つことを新たに発見した。構築した理論を用いて2.45 GHzにおいて回折限界を超える波長の10分の1離れた2スポットのサブ波長解像を確認するとともに、従来の共鳴を用いる方式のものに比べて倍となる8%の動作帯域を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、原理的には体積を持たず、実効的な媒質定数が定義できないメタ表面に対して、これまで考えられていなかったエバネセント波の発生と操作のための合理的な設計指針を与えるもので、その学術的意義は大きい。また、本研究により判明した、通常実数と考えられている自由空間インピーダンスが、エバネセント波の生成時には虚部を持つことも重要な発見である。本研究成果は、高分解能非侵襲生体センサー等の電磁波応用から光学応用等、幅広い分野への展開が期待でき、社会的な波及効果も大きい。

研究成果の概要（英文）：In this research, the design theory for artificial structured surfaces (metasurfaces) with evanescent wave generation and manipulation functionalities for wideband subwavelength focusing operations exceeding the diffraction limit. It is found that the free space impedance, which is generally considered to be a real quantity, possesses an imaginary part when generating evanescent waves. It is experimentally shown that a two-spot subwavelength focusing exceeding diffraction limit less than one tenth of the wavelength is realized at 2.45 GHz with the doubled relative operation bandwidth of 8% compared with that of a conventional metasurface.

研究分野：メタマテリアル

キーワード：メタマテリアル メタ表面 エバネセント波 回折限界 サブ波長解像

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 【サブ波長解像とエバネセント波】 通常、回折限界により光や電磁波を波長よりも細かい分解能で集光させることはできない。これは高い分解能を担う空間高調波成分がエバネセント波であるため非伝搬となり結像に寄与できないことが原因である。しかし、図1の様にある面であらかじめエバネセント波を生成・増強することができれば像面において回折限界を超えるサブ波長の解像は原理的に可能である。

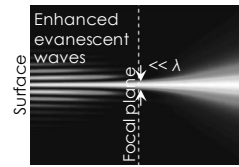


図1 メタ表面によるエバネセント波の発生概念図

(2) 【メタ材料と特異物性】 波長に比べて小さい材料

片を原子分子に見立てて配列した構造体は、光や電磁波に対して実効的な媒質として振る舞う。このような構造体は人工媒質あるいはメタ材料と呼ばれている。この人工的な媒質構成の概念を用いれば、例えば負の屈折率を持つ媒質や、覆うと見えなくなる透明マントのような、自然の材料が示さない特異な物性を実現することができる。メタ材料の概念は波長に関してスケラブルな幅広い概念であり、近年マイクロ波帯において工学応用も進んでいる。

(3) 【メタ材料中のエバネセント波】 メタ材料の示す特異な物性は、材料の実効的な媒質定数で決まる伝搬波とエバネセント波の2つの性質によるものである。例えば、負屈折率媒質や透明マントは、媒質中の伝搬波に対して分散性や異方性を制御したものである。一方、メタ材料中ではエバネセント波も特異な性質を示す。例えば、自然の材料中ではエバネセント波は伝搬に伴い減衰するが、負の屈折率を持つメタ材料中ではエバネセント波は伝搬に伴い増大する。これにより原理的には回折限界を超える解像を行うスーパーレンズが実現可能である。しかし、現実的には材料中のエバネセント波は材料の損失により回折限界を超える解像を得るのに十分な増大が得られず、その実現は比較的損失の小さなマイクロ波領域に限られている。また、ハイパボリックな分散特性を持つ異方性メタ材料を用いれば、エバネセント波を伝搬波に変換し解像度を保ったまま像を別の空間に転写することが可能である。しかし、この例でもエバネセント波を積極的に生成し操作するものではなかった。

(4) 【メタ表面によるエバネセント波の生成】 一方、体積的な媒質を用いず、1層または複数層の構造体をシート状に並べた薄いメタ表面によって、エバネセント波を生成し利用しようという試みも提案されている(Grbic, Science 320 5875 (2008))。これはメタ表面を透過する波のローカルな位相と振幅をサブ波長域で制御するもので、表面上で大きな波数を持つエバネセント波を積極的に発生させるものである。これはエバネセント波を体積的なメタ材料中を伝搬させ増大させる場合に比べて、低損失化の面で原理的に有利である。また平面的な加工のみで実現できるため作製も容易である。しかし、その設計理論は確立されておらず、また前述の原理検証例においては、メタ表面を構成要素(メタ原子)の共鳴を用いて実現しているため、狭帯域かつ高損失で、透過率の低下や収差の問題を抱えている。広帯域かつ低損失にエバネセント波を生成し操作するメタ表面はまだ実現されていない。

### 2. 研究の目的

(1) 【研究目的】 本研究では、申請者が提案している伝送線路理論に基づくメタ材料の媒質構成理論をメタ表面の設計に適用し、これまでなかった広帯域かつ低損失にエバネセント波を生成・操作するためのメタ表面の構成理論を構築し、回折限界を超える結像を実証することを目的とする。

(2) 【研究目標】 上記の目的を達成するため本研究では次の2点を目標とする。

目標 1. 回路論に基づくメタ表面の構成理論の構築 原理的に体積を持たず誘電率や透磁率の媒質定数が定義できないメタ表面に対して設計理論を確立する。離散化されたメタ表面に対し、各区間内の実効的な電気分極率および磁気分極率に対応する回路網パラメータを導出する。

目標 2. サブ波長解像の実証実験 提案するメタ表面の構成理論の妥当性と有用性を示すため、本理論を用いてメタ表面を設計・試作し、実証実験を行う。焦点面上で波長の1/10以下の領域に電磁波が解像されること目標とする。

### 3. 研究の方法

(1) 【問題の構成】 まず、「目標 1. 回路論に基づくメタ表面の構成理論の構築」を達成するため、図2のような領域1と領域2の境界における境界面を考え、この境界への入射波に対して境界  $u$  が任意の透過波を作ること考える。本研究は、理論的には境界  $u$  上の点に入射する局所的な入射電磁界( $E_1, H_1$ )から伝搬波とエバネセント波を含む任意の電磁界( $E_2, H_2$ )を生成しようとするものである。

一般に( $E_1, H_1$ )と( $E_2, H_2$ )は不連続となるため、マクスウ

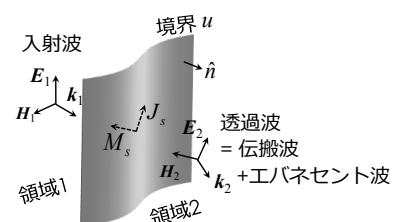


図2 領域境界と電磁界

エル方程式の境界条件から、境界  $u$  上において電流および磁流がそれぞれ電流密度  $\mathbf{J}_s$  および磁流密度  $\mathbf{M}_s$  で分布して流れなければならない。そこで、この境界  $u$  を図 3 の様に離散化し、各区域において  $\mathbf{J}_s$  と  $\mathbf{M}_s$  と等価なメタ原子を配置する。この時、図 4 の様に面内波数  $k_{||}$  が自由空間の波数  $k_0$  よりも大きくなる ( $k_{||} > k_0$ ) 様な  $\mathbf{J}_s$  と  $\mathbf{M}_s$  の分布を持つメタ原子を局所的に操作することで法線方向に非伝搬となるエバネセント波が発生可能である。

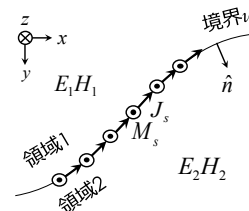


図 3 境界上の離散化と実効電流密度・磁流密度

(2) 【メタ原子のモデリング】 このようなメタ表面を設計するため、メタ原子を図 5 の様な二端子対回路網モデルで表す。このメタ原子の応答  $f$  と等価となる回路網パラメータの関係をマクスウェル方程式と回路の対応関係から導出する。このパラメータは物理的には境界上に存在する実効的な電気分極率および磁気分極率に対応するものであり、これを表すパラメータ(一般的にはイミッタンステンソルとなる)は、外部入射波からエバネセント波を含む任意の電磁界を生成するための、いわゆる設計図となるものである。

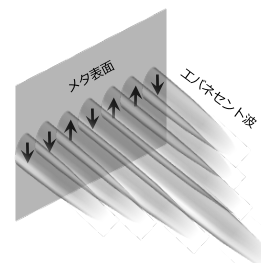


図 4 メタ表面によるエバネセント波の生成

(3) 【増強エバネセント波の計算】 提案するメタ表面の構成理論の妥当性と有用性を示し、「目標 2. サブ波長解像の実証実験」を達成するため、本理論を用いてサブ波長解像を実現するメタ表面を設計する。解像するサブ波長像に対して、必要なエバネセント成分を計算し、逆伝搬問題を解くことで、メタ表面上で生成すべき増強されたエバネセント波を求める。

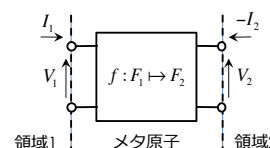


図 5 メタ原子の二端子対回路モデル

(4) 【構造決定】 次に、これを実現するメタ表面の物理構造を決定する。任意のメタ原子の構造に対して 3 次元電磁界シミュレーションにより反射波と透過波の応答を求め、必要な変換  $f$  と等価となる構造最適化を行う。この際、回路トポロジーとパラメータ値を回路論から理論的に決定し、独立した構造パラメータを選定することで大幅な計算時間の短縮を図る。

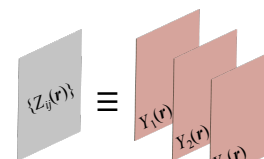


図 6 3層構造モデル

(5) 【実証実験】 最後に、現有の近傍電磁界測定装置を用いて解像面上の複素電磁界分布を測定し、設計した焦点面上で波長の 1/10 以下の領域に電磁波が解像されることを示す。

#### 4. 研究成果

(1) 【メタ表面の構成理論の構築】 研究方法(1)および(2)に従い、図 1 の構成において、メタ原子のモデリングを行なった。作製の容易性を考慮して、3つの設計自由度を持つ図 6 の3層イミッタンス表面構造を提案し、これが等価となる各層の実効アドミタンス値設計式を導出した。理論の妥当性を示すために、波長の 1/10 離れた 2 スポットのサブ波長の像を解像するメタ表面を設計し、数値シミュレーションによりその動作を確認した。図 7 に得られた解像結果を示す。また、図 8 に焦点面における像の分布を示す。同図には、比較のため、設計した像および、エバネセント波を増強しなかった場合の結像結果を示してある。シミュレーションにより得られた像は、理論的に設定した像と良く一致しており、波長の 1/10 の 2 つの像が確認できる。また、エバネセント波を増強しなかった場合は 2 つのスポットがほぼ区別できなかった。以上のことから、本理論の妥当性が示された。

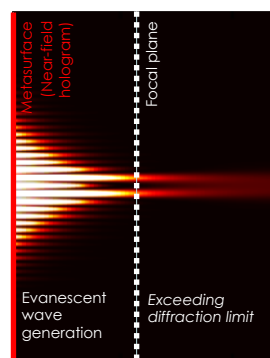


図 7 2 スポットサブ波長解像結果(シミュレーション)

(2) 【複素自由空間インピーダンスの発見】 本理論により、エバネセント波の生成時には、自由空間に対するインピーダンスが

$$\eta = \eta_0 k_0 \frac{\sum_n E_{tn} e^{-jk_{tn}x}}{-\sum_n^{k_0 \geq k_{tn}} E_{tn} \sqrt{k_0^2 - k_{tn}^2} e^{-jk_{tn}x} - j \sum_n^{k_{tn} > k_0} E_{tn} \sqrt{k_{tn}^2 - k_0^2} e^{-jk_{tn}x}}$$

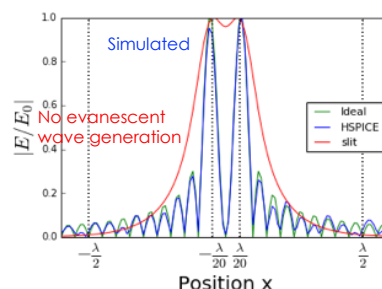


図 8 結像面上の電界分布果(シミュレーション)

で与えられ、複素数となることが新たにわかった。ここで  $j$  は虚数単位である。これまで自由空間インピーダンスは実数であると考えられており、この事実は、物理的にも新たな知見を与えるとともに、サブ波長解像の設計上にも重要な発見である。

(3) 【サブ波長解像実証実験】 構築した理論を用いてメタ表面を設計・試作し、これを用いてサブ波長解像実証実験に成功した。

これには、まず、2.45GHz において動作する、波長の  $1/10$  離れた 2 スポットのサブ波長の像を解像するとし、研究方法(3)に示した手法を用いて、スペクトラル領域でこの解像に必要なエバネセント成分を計算し、逆伝搬問題を解くことで、メタ表面上で生成すべき増強されたエバネセント波を求めた。次に、研究方法(4)に従い、実効アドミタンスと等価な微視的なメタ表面構造を電磁界シミュレーションにより面全体にわたって求めた。これを図6の3層全てに対して行い、全てのメタ表面構造を決定した。

続いて、設計したメタ表面を試作し、これを用いてサブ波長解像の実証実験を行なった。設計した3層のメタ表面金属構造を、比誘電率 2.85、厚さ 3.2mm の誘電体基板上を用いて作製した。試作したメタ表面を図9に示す。このメタ表面にホーンアンテナにより電磁波を入射し、電界プローブを用いて近傍電磁界測定を行なった。測定した電磁界分布を図10に示す。図より、設計周波数である 2.45GHz において波長の  $1/10$  離れた 2 スポットのサブ波長の像が確認できた。周波数を変化させた実験によれば、2 スポット解像の可能な周波数範囲は 20MHz (比帯域 8%) であった。これは、共振構造を用いた先行研究の 4% と比較して倍であり、本方式の広帯域性が示された。

以上のことから、本研究の目的である、広帯域にエバネセント波を生成・操作するためのメタ表面の構成理論を構築と、回折限界を超える結像を実証が達成された。本研究成果は、高分解能非侵襲生体センサー等の電磁波応用から光学応用等、幅広い分野への展開が期待でき、社会的な波及効果も大きい。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 0 件)

〔学会発表〕 (計 8 件)

- ①真田篤志, メタ表面入門, 第9回電磁メタマテリアル講演会, 2019 (招待講演)
- ②真田篤志, メタマテリアル技術が拓く電磁波応用の最新動向, IEEE MTT-S 2018 Kansai Chapter Workshop, 2018 (招待講演)
- ③Atsushi Sanada, Katsuhiro Ishii, Yuto Kato, Yuki Okumura, Evanescent Wave Generation and Subwavelength Focusing by a Multilayer Metasurface, A3 Metamaterial Forum, 2018 (招待講演) (国際学会)
- ④真田篤志, メタマテリアルのシミュレーション技法, 電子情報通信学会 2018 年ソサイエティ大会, 2018 (招待講演)
- ⑤真田篤志, メタマテリアル設計のためのシミュレーション技術, 2018 Microwave Workshop and Exhibition, 2018 (招待講演)
- ⑥真田篤志, メタマテリアルによる電磁波伝搬制御, 第8回電磁メタマテリアル講演会, 2018 (招待講演)
- ⑦真田篤志, メタマテリアルの最新動向, 2017 Microwave Workshop and Exhibition, 2017 (招待講演)
- ⑧Atsushi Sanada, Katsuhiro Ishii, Evanescent Wave Generation for Sub-Wavelength Focusing with a Trilayer Metasurface, Japan-Russia Joint International Microwave Workshop 2017, 2017 (招待講演) (国際学会)

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

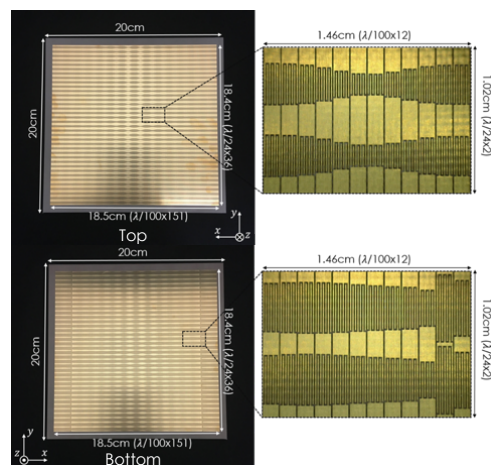


図9 試作メタ表面

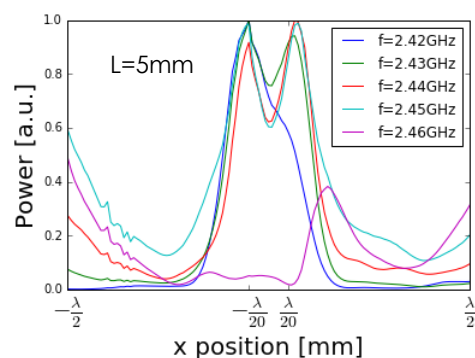


図10 測定結果

[その他]  
ホームページ等  
Sanada Laboratory  
<http://www.ec.ee.es.osaka-u.ac.jp>

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。