

<研究紹介・自己紹介>

研究項目 A01 計画研究ア

「周期構造を利用したマイクロ波メタマテリアルの開発と応用」

研究分担者 久保 洋 (山口大学)

私は山口大学大学院理工学研究科電子情報システム専攻に所属しており、電磁波デバイス工学に関する研究と教育を行っています。特に最近ではマイクロ波分野の漏れ波アンテナ等の通信用電磁波デバイスやメタマテリアルといった電磁波を導波する構造を利用してデバイスへ応用することに興味を持っています。学生時代は「光通信」という言葉が新聞やテレビに登場した頃で、光導波路を対象とした電磁波数値計算法について勉強をしていました。1度メーカーに就職をして、やはり当時、一般に名前が知られるようになった「自動車電話」、いまの携帯電話について研究開発を行い、大学に戻ってきました。紆余曲折があり、当時の何か新しいものばかりに飛びついている感もありますが、ここ20年ほどは先に述べましたマイクロ波の分野で仕事を行っています。

マイクロ波に関わるようになって周期構造を扱うことが何度かありました。その関係で十数年前に金属ストリップを周期的に並べた人工誘電体の概念に出会った時、自然に人工媒質の世界に入ることになりました。最初の数年間は人工誘電体を研究対象としていたのですが、そのころ、あの David Smith 等による負屈折率媒質の論文が出まして、段々と研究対象がメタマテリアル一般へと広がりました。

さて現在行っている課題から一つご紹介します。図1に示すのは左手系の伝送線路モデルに基づいて構造設計を行った2次元の負屈折率媒質です。誘電体円柱に銅箔がz軸方向に周期的に巻かれています。この図では見にくいですが、銅箔と銅箔は細い銅線で接続されています。このような円柱をx-y平面内で6方格子状に並べたものは、x-y平面内を伝搬するz方向に偏波した電磁波に対して、負屈折率媒質としての特性を示します。電気回路の観点からこの構造を説明すると、巻きつけた銅箔と隣の円柱の銅箔の間にキャパシタンスがあり、これがy-z平面内を伝搬する電磁波にとっては伝送線路の直列成分と

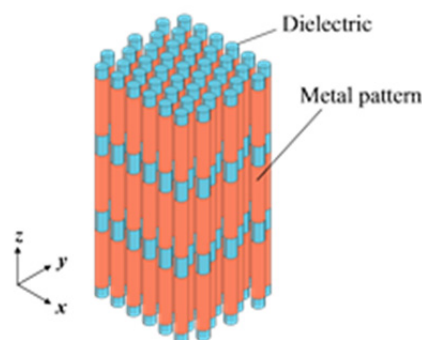


図1 2次元負屈折率媒

なります。また銅箔間を接続する銅線はインダクタンスを持ち並列成分となるため、左手系の伝送線路となります。実験では、このような円柱を6方格子配置を基本として厚みのある板状に並べ平板型レンズを作成しました。平板型レンズに線状波源から4.34GHzの電磁波を入射させて、レンズの反対側で電界分布を測定しました。図2(a)(b)はその大きさと位相を表しています。また波は概ねy軸方向に伝搬しています。図の中心あたりで大きくなり、またその周囲で位相は同心円状になっています。このことから板状媒質を通過した波はここで焦点を結んでいることが分かります。さらに $y = 90$ mmの断面内の電界分布から、回折限界を超える像が得られるというスーパーレンズとしての評価を行っています。

このように2次元の負屈折率媒質としては働くのですが構造が複雑で、より高い周波数で製作するのは中々難しいところです。もう少し簡単な構造で負の屈折率を持つものができるか、また3次元の負屈折率媒質構造が次の課題だと考えています。

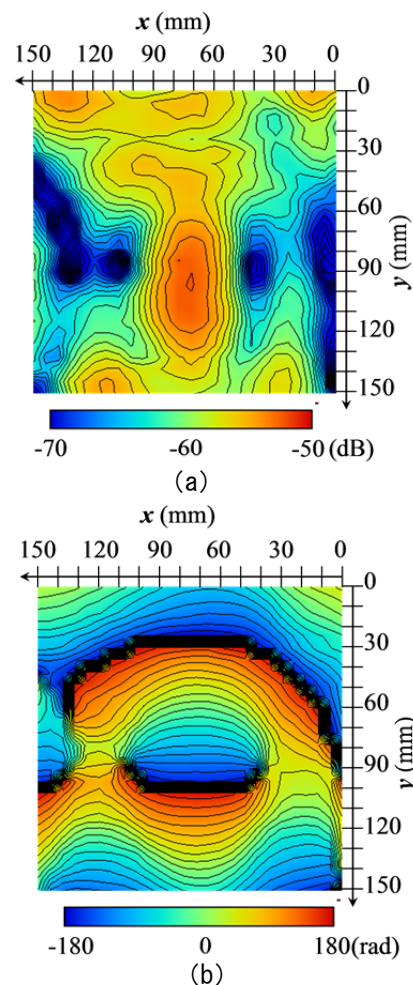


図2 電界分布

(a)振幅分布 (b)位相分布

[1] H. Kubo, K. Nishibayashi and A. Sanada, " New Negative Index Material and Experimental Verification of Exceeding Diffraction Limit," Proceedings of the 40th European Microwave Conference, Paris, pp.25-28, Dec. 2010.

[2] T. Fukushima, H. Kubo, A. Sanada, and T. Yamamoto, "Negative Index Material Composed of Cylinders with a Metal Pattern," Proceedings of the Asia-Pacific Microwave Conference 2011, Melbourne, pp.530-533, Dec.2011.



<研究紹介・自己紹介>

研究項目 A01 計画研究ア

「周期構造を利用したマイクロ波メタマテリアルの開発と応用」

研究分担者 堀井康史（関西大学）

研究計画アで、マイクロ波用メタマテリアルデバイスの開発を目指している関西大学の堀井康史です。ここでは、私自身が行ってきたメタマテリアル研究とその背景についてご紹介したいと思います。

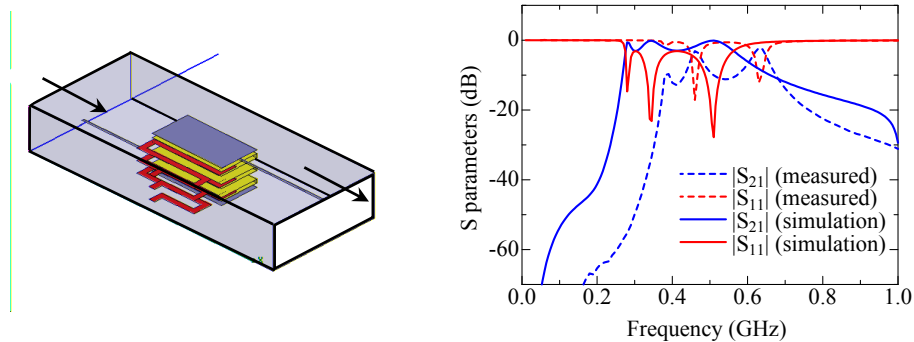
2000年、D.R.Smithがスプリットリング共振器と金属細線の組み合わせで左手系メタマテリアルの実現に成功し、これによって多くの研究者がメタマテリアルに関心を寄せることになったのはご周知の通りです。しかし、マイクロ波デバイスの開発に携わっていた私には、その2年後に登場した伝送線路系メタマテリアルこそ本当の意味で大きなショックでした。UCLAのT.Itoh氏、C.Caloz氏、A.Sanada氏が中心となって2002年にCRLH伝送線路を提案し、コンデンサとコイルを組み込んだ簡単な伝送線路構造で左手系メタマテリアル特有の特異な物理現象を広帯域に、かつ低損失に発現できることを報告しました。左手系帯域ではバックワード波が伝搬し、位相進みが発生する。この位相特性を利用すれば、従来にはない広帯域動作のデバイスや多周波動作のデバイスが自由に設計できるという、まさに夢のような研究成果が続々と生まれてきました。さらに、漏れ波アンテナでは、180度のビーム走査が可能なアンテナも紹介され、一気にメタマテリアル研究が熱を帯びてきました。

その当時、私の職場では2003年度の在外研究員の募集があり、何としてもという思いで書いた計画書が評価されたのか、運よくその権利を獲得することができました。2003年9月から1年間の海外生活。とはいえ、海外経験の乏しかった私は「ロス市警 24時間」のテレビ番組を見るにつれ、家族(当時、子供が8歳)をロサンゼルスに連れて行ってもいいものかと思悩み、在外期間の前半を家族と治安の良いビクトリア(カナダ)で暮らし、その後、単身で私だけがアメリカにわたることに決意しました。

UCLAではC.Caloz氏、S.Han氏、そしてDGS(Defected Ground Structure)の生みの親として知られるD.Ann氏と同室となり、彼らの研究スタイルを眺めつつ、昼夜を問わず研究に打ち込んだものでした。UCLAにおける研究効率の良さは、即座のディスカッションにあったように思います。誰かが新しい案を

思いつくと、「これ、どう思う」とすぐさま同室の仲間とディスカッションに入る。それと同時に元のアイデアにどンドンと磨きかけられ、骨格ができ上がり、そこから枝葉が広がっていく。さらに High Frequency Center では、エッチング用マスクの作成から測定までを瞬時に行える環境が整っており、朝に得たアイデアがその日のうちに検証できるような態勢がとられていました。かつて、Caloz 氏より「1 日 1 本、論文を書こう」と言われたことがありましたが、まんざらジョークではなかったのかもしれませんが。在籍中、Caloz 氏にさまざまな CRLH 回路を見せていただき、それらの回路がデバイス設計に極めて魅力的な特性を持ち備えていることを教えていただきましたが、1 点どうしても気になったのが回路寸法でした。せつかくの特性もあのように大きくては、実用の際に問題になることは明確でした。その点を何とか克服しようとして生まれたのが積層型 CRLH 伝送線路です。

メアンダ線路を 2 組の金属平板でサンドイッチ状に挟んで積層化し、これらをビアで結んでユニットセルとしたものを、上下に積み重ねることで積層型 CRLH 伝送線路を実現します。動作原理は従来の平面型 CRLH 伝送線路と同じですが、いざ広帯域で挿入損の小さなものを作ろうとしてもなかなか特性が出ず、結果的に図 1 のような実用性を欠いた特性となってしまいました。おまけに、12 枚の基板をカづくで積層した手製の試作モデルでしたので、その実験特性も大きく乱れてしまいました。



(a) 構造図

(b) 散乱特性

図 1 UCLA において考案した初代積層型 CRLH 伝送線路[1]

在外研究を終え、日本に帰国後もその特性の改善を細々に行っていました。今から思えばずいぶんとさまざまな構造を試したものでしたが、最終的な構造

では、平行金属板の中央の金属を取り除いて右手系直列インダクタンスを大きく取れるように工夫し、さらにメアンダ線路と平行金属板との結合を抑えるようにメアンダ線路の配置を調整することで、特性が大幅な改善へとつながりました。図2は2008年に発表した2代目の積層型CRLH線路で、図1のものに比べて通過帯域が非常にフラットで、挿入損も大きく改善されていることがお分かりいただけるかと思います。なお、このモデルは、比誘電率2.59のRexolite 2200基板を用いて $6.0 \times 5.0 \times 2.85 \text{ mm}^3$ の寸法で実現したものです。

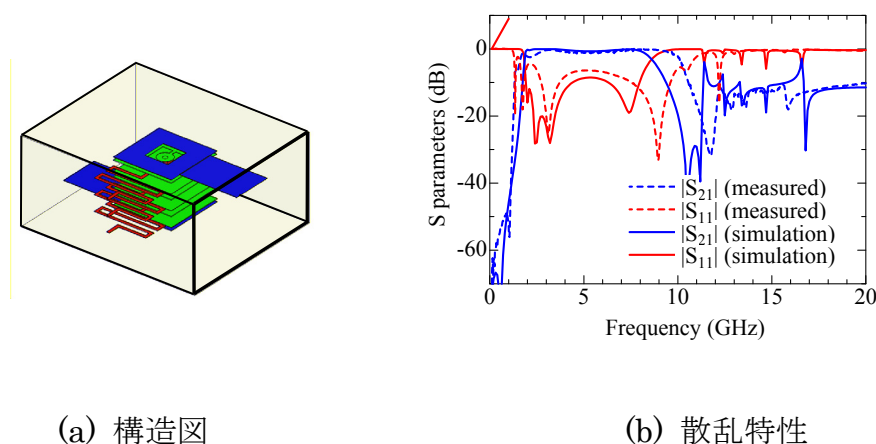
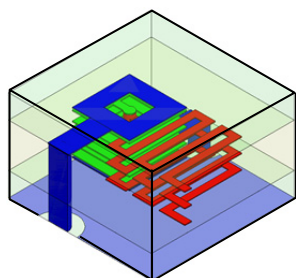


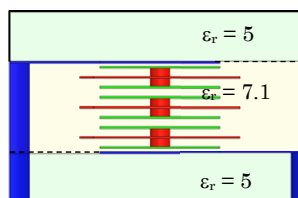
図2 2008年に報告した第2世代の積層型CRLH伝送線路とその特性[2]

最後にご紹介するのが、LTCC積層化技術で作製した図3のCRLH伝送線路で、回路寸法は $1.5 \times 1.5 \times 0.95 \text{ mm}^3$ と米粒大です。回路構造がこれまでご紹介したものと大変似ているためあまり変化がないように思えるかもしれませんが、圧倒的な小型化を実現しています。また、このような小型化を図るとさまざまな箇所でも思いもよらない結合が生じ、その結果、いとも簡単に伝送特性が劣化してしまいます。これを防ぐため、回路形状の微調整とセラミック材料の選定には注意を払っています。散乱特性から確認できるように3GHzから16GHzまで挿入損の少ないフラットな特性を実現できていることが確認できます。また、さらに注目すべき点は左手系帯域が非常に広いことで、このモデルの左手系帯域はFCCが掲げる3.1GHzから10.6GHzのUWB帯域と完全に一致しています。このように左手系が広がるのは、左手系回路パラメータの寄与にくらべて、右手系パラメータの寄与が大幅に少ないためで、純粋な左手系メタマテリアルを作ることが不可能といわれてはいますが、小型化することで右手系回路の寄与を抑圧し、純粋な左手系特性に近い特性を実現できることをこの米

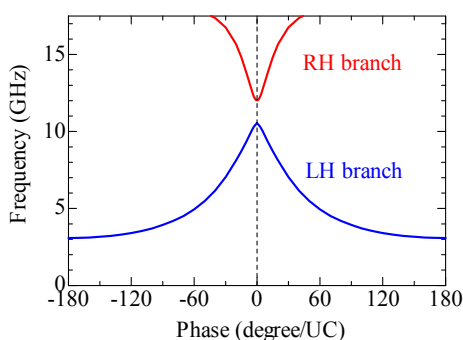
粒大モデルは物語っています。



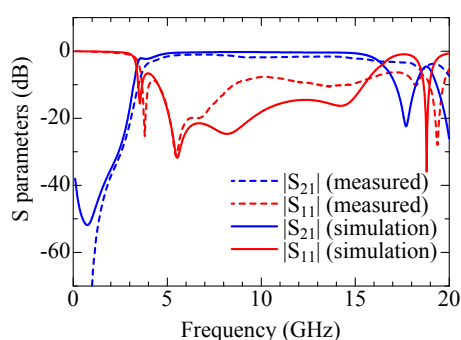
(a) 構造図



(b) 側面図



(a) 分散特性



(b) 散乱特性

図3 2010年に報告した第3世代の積層型CRLH伝送線路とその特性[3]

今後のデバイス研究においては、ここでご紹介した積層メタマテリアル技術をさまざまな高周波回路設計にフル活用することで、より小型・高機能なデバイスを提案し続けていきたいと考えています。

- [1] Y. Horii, C. Caloz, and T. Itoh, "Super-compact multi-layered left-handed transmission line and diplexer application", IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech., vol.53, no.4, 1527-1534, April 2005.
- [2] Y.Horii, "A super-compact balanced multi-layered CRLH transmission line with wideband LH properties for microwave phase engineering," IEEE Int'l Microwave Symp., Proceedings, TU1F-4, pp.53-56, June 2009.



- [3] Y. Horii, N. Inoue, T. Kawakami, and T. Kaneko, "Super-compact LTCC-based multi-layered CRLH transmission lines for UWB applications," European Microwave Conf., Proceedings, Manchester, UK, Sep. 2011.



<研究紹介・自己紹介>

研究項目 A02 計画研究力

「プラズモン共鳴型光波メタマテリアル表面の創製技術の開発」

研究分担者 岡本敏弘（徳島大学）

研究項目 A02：計画研究力「プラズモン共鳴型光波メタマテリアル表面の創製技術の開発」で分担研究をさせていただいている徳島大学の岡本敏弘です。

自己紹介・研究内容紹介をさせていただきます。

私は、徳島大学工学部の福井萬壽夫教授の研究室で卒業研究を始めてから、プラズモニクス分野で研究を行ってきました。配属当時の研究室では、全反射減衰(Attenuated Total Reflection:ATR)配置における表面プラズモンポラリトン (Surface Plasmon Polariton:SP) 励起による共鳴信号を利用して、金属の真空蒸着膜成長時の複素誘電率の評価や、金属蒸着膜の表面凹凸評価、屈折率のほぼ等しい誘電体で挟まれた金属薄膜の長距離伝搬型 SP に関する研究など、伝搬型 SP の原理検証、伝搬型 SP を用いた物性計測が行われていました。福井先生から、「SP 励起可能な金属+光カー材料（光強度に依存して屈折率を変える材料）で生じる光双安定・光スイッチ現象に関する研究を新しく始めようかと思うがやってみないか？」と勧められて興味を持ち、卒研テーマを決めました。それ以来、私の研究の根底には、いつもこのテーマがあります。

学生時代は、光カー材料の薄膜を含む ATR 配置で生じる非線形光学応答の計算機シミュレーションや、有機三次非線形光学材料のポリジアセチレンを用いた光双安定・光スイッチ現象の実験等を行い、徳島大学工学部光応用工学科の助手になってからは金属障害物における伝搬型 SP の反射実験なども行いました。2000年頃から、局在型表面プラズモン (Localized SP:LSP) に興味を持ち、金属微粒子と光カー材料を組み合わせれば、ナノ微粒子 1 個でも非線形応答を示す光デバイスができるのでは？と考えるようになりました。学生時代に行っていたシミュレーション手法を応用し、Mie 散乱理論に光カー効果を導入することで、光カー材料を含むコアシェル微小球の非線形光学応答のシミュレーションが可能になりました。予想通り、特定の条件下で光双安定・光スイッチ現象が生じるという結果を得ることができました。その後、研究は実験に推移していきました。光カー材料をコートした金属ナノ微粒子の作製、電界増強効果の高い金属ナノ微粒子の作製、単一ナノ微粒子の非線形光学特性評価手法の構

築などを、研究室の学生達と試行錯誤しながら進めてきました。そうして何とか、逆ミセル法で CdS コート銀ナノ微粒子が作れるようになり、また数 10nm 程度の大きさのたった 1 個の微粒子で、散乱光強度の非線形応答を観測できるようになりました。[1] 最近では、プラズモン導波路の研究や、北海道大の三澤弘明教授のグループで作製していただいた、KTP 基板上的数 nm ギャップを持つ金ナノダイマーを利用した局所 SHG についての研究も行っています。

メタマテリアルについて知ったのは 2005 年です。多くの先生方と共同で申請していた科研費のテーマが SPP からメタマテリアルに変わったのがきっかけです。その時福井グループ担当の申請書類の一部を私も書きましたが、当時理解が不十分で的外れな内容を書いていたかもしれません。その後、銀の分割リング共振器 (Split Ring Resonator: SRR) 構造の電磁界特性の FDTD シミュレーションを行ってみたところ、SRR で LC 共振が起きることや、ギャップで高い電界増強効果が生じていることが確認され、SRR が非常に魅力的な構造であることを実感しました。またその頃、研究室の学生が、大学共用設備の集束イオンビーム (Focusing Ion Beam: FIB) 加工機で、1 個の孤立した直径 200nm 程度の 2 分割 SRR を作ってくれました。可視波長域で LC 共振を示す SRR は以外と簡単に手に入るのかも？そう思って本格的に研究を始めようとした矢先、共用設備の FIB 加工機が故障し復旧する目処が立たなくなってしまいました。他の研究施設の装置を借りたりもしましたが、なかなか思うような SRR が作れず、FIB 加工では可視波長域で LC 共振動作を示す SRR を実現するのは無理だと判断し、別の方法を検討することにしました。結局、ポリスチレン球をマスクとして金属蒸着とドライエッチング処理で金属ナノ構造を作る微小球リソグラフィ (Nano-Sphere lithography: NSL) 法にたどり着きました。幸いにも、研究室には反応性イオンエッチング (Reactive Ion Etching: RIE) 装置があり、

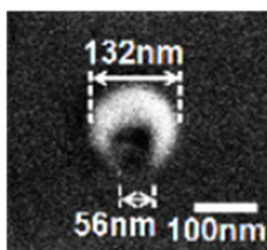


Fig.1 銀分割リング構造の電子顕微鏡像

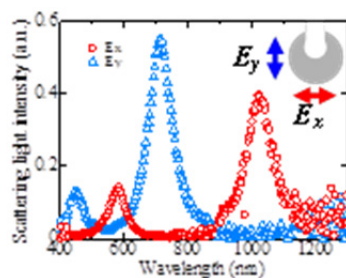


Fig.2 銀分割リング構造単体の散乱光スペクトル測定結果



全作製工程を研究室内で行うことができます。直径 100nm 程度の銀 SRR をガラス基板上に作ることができ、1 個の SRR による散乱スペクトル測定から、波長約 1 μ m で LC 共振に由来する散乱ピークが生じることを実験で示しました。

(Fig.1,2 [2]) その後 SRR サイズの小型化が進み、今では、約 730nm の LC 共振波長を持つ SRR の作製に成功しています。

さて、本新学術領域研究では、迫田班の方々と協力して「プラズモン共鳴型光波メタマテリアル表面の創製技術の開発」を進めて参ります。研究対象の反射型メタ表面は、波長よりも小さい幅の金属の溝が高密度に集積された表面で、線形のみならず非線形光学応答にも特異な現象が生じると期待される興味深い構造です。物質・材料研究機構のチームによって非常に高い精度で作られたこの構造の光学特性を、可視-近赤外波長域に渡り様々な手法で評価するのが私の仕事になります。どのような結果が出てくるか楽しみです。

参考文献 :

[1] T. Okamoto et al., *Appl. Phys. Express* 1(6), 062003 (2008)

[2] T. Okamoto et al., *Opt. Express* 19, 7069 (2011)