

### 多重偏波放射を可能とするメタマテリアル螺旋状アンテナの理論と実験検証

中野, 久松 / NAKANO, Hisamatsu

---

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

科学研究費助成事業 研究成果報告書

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

6

(発行年 / Year)

2015-05

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 27 日現在

機関番号：32675

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560481

研究課題名(和文) 多重偏波放射を可能とするメタマテリアル螺旋状アンテナの理論と実験検証

研究課題名(英文) Theory and experimental verification of metamaterial spiral antennas for multi-polarized radiation

研究代表者

中野 久松 (NAKANO, Hisamatsu)

法政大学・理工学部・教授

研究者番号：00061234

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、多重偏波メタマテリアルアンテナを理論に基づき創造し、実験により確認している。次の点を明らかにしている。1) アンテナ動作原理。2) 低姿勢構造化における放射諸特性。3) アンテナ動作周波数帯域。「メタマテリアル螺旋状アンテナおよび螺旋状の極限であるループアンテナは、10%以上の帯域にわたり、4重偏波(右旋、左旋円偏波および水平、垂直直線偏波)を放射できる」ことを明らかにしている。

研究成果の概要(英文)：Multi-polarized metamaterial antennas are created on the basis of theoretical investigation and confirmed by experimental work. The following points are clarified: 1) the antenna mechanism, 2) the radiation characteristics for a low-profile antenna structure, and 3) the antenna operating bandwidth. It is found that the metamaterial spiral and loop antennas operate across a bandwidth of more than 10%, radiating right- and left-handed circularly polarized waves, and horizontal and vertical linearly polarized waves.

研究分野：工学

キーワード：メタマテリアル 多重偏波放射 円偏波 直線偏波 スパイラルアンテナ ループアンテナ

### 1. 研究開始当初の背景

電気磁気学における誘電率と透磁率の両方または一方が負である材料を、Metamaterial (MTM) とよんでいる。そのままの形では自然界には存在しない材料である。誘電率と透磁率の両方が負の場合、伝送線路の位相定数は負となる。光波周波数領域での MTM についての研究とともに、現在、マイクロ波領域での MTM の研究が進みつつある。国内では、東北大、防衛大、横浜国大、福井大、名古屋工大、大阪大、山口大、トヨタ中研、法政大などが研究に着手し、MTM を使用した漏れ波アンテナや小型モノポールアンテナが造り出されている。国外では、米国 UCLA、アリゾナ大、カナダトロント大などが、小型アンテナを開発し、携帯電話への搭載をおこなっている。しかしながら、漏れ波アンテナを除き、これまで開発された MTM アンテナは動作周波数帯域が極めて狭く (1% 未満)、使用範囲が限られている。また、アンテナの放射偏波は直線偏波が多く、円偏波放射を実現したものは少ない。結論的に言えば、1つのアンテナで、円偏波と直線偏波を広い周波数帯域にわたり放射できるアンテナはまだ無い。

### 2. 研究の目的

現在、新材料 (メタマテリアルとよばれる) の特性を利用し、新しい機能・性能を有する電子機器の研究開発が、国内外で進みつつある。本研究では、1 給電アンテナであっても、異なる周波数において、右旋円偏波、左旋円偏波、水平偏波、垂直偏波を放射できる「多重偏波放射メタマテリアル螺旋状アンテナ」を創造し、次の点を遂行する。(1)「負の位相定数」の効果によって生じる多重偏波放射の動作原理を明らかにする。(2)アンテナの高さを 100 分の 1 波長程度に低姿勢化した状態に於ける多重偏波放射の諸特性を明示する。(3)前項 1 および 2 の考察から、多重偏波放射における動作周波数帯域 (限界値、バンド幅) を明示する。

### 3. 研究の方法

本研究では、多重偏波放射 (右・左旋円偏波放射、水平・垂直直線偏波放射) のうち、2 重円偏波放射 (右・左旋円偏波放射) に重点をおいて理論を構築した。その際、1-10 GHz の周波数を用いた。リアクタンス素子をアンテナに挿入し、アンテナアーム上を流れる電流の振る舞いから、2 重円偏波放射における「放射とアンテナ形状との関係」を明らかにした。これにより、「2 重円偏波放射の原理、および動作帯域を決定する要因」が把握できた。さらに、2 重円偏波放射の起こる周波数の中間の周波数 (平衡条件周波数) において、直線偏波放射が可能である、ことを見出した。この場合の平衡条件周波数における電流モードを明示した。

### 4. 研究成果

電気磁気学における誘電率と透磁率の両方または一方が負である材料を、メタマテリアルとよんでいる。本研究は、アンテナ単体で、右旋円偏波、左旋円偏波、水平偏波、垂直偏波を放射できる「多重偏波放射メタマテリアルアンテナ」を創造することにある。研究成果の概略を以下に示す。

#### (1) 平面螺旋状構造の極限アンテナ

##### 2 バンド反円偏波放射

平面螺旋状構造の極限として、ループアンテナを検討した。ストリップループアームを誘電体基板 (厚さ=1.6mm, 誘電率=2.6) 上に印刷し (図 1 参照)、アンテナ高を低姿勢にするために、アームにインダクタンスおよびキャパシタンスを挿入した。アームの端点から給電すると、「周波数 2.6 GHz 付近で左旋円偏波、3.6 GHz 付近で右旋円偏波が放射される」ことを明らかにした (図 2 参照)。2.6 GHz 付近、及び 3.6 GHz における円偏波放射帯域は、それぞれ 14.17%、14.27% と算出された。

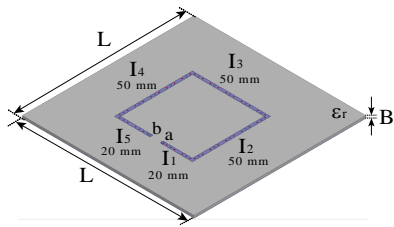


図1 メタループアンテナ

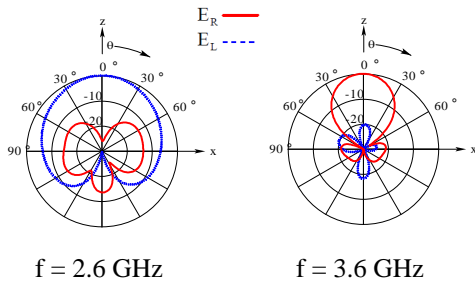


図2 放射パターン

挿入インダクタンスおよびキャパシタンスの損失に関する検討

「ループアンテナとスパイラルアンテナのアーム上に無損失のインダクタンス及びキャパシタンスを挿入すると、異なる周波数に於いて右旋円偏波と左旋円偏波が得られる」ことを理論・実験により確認した。さらに、挿入インダクタンス及びキャパシタンスに損失がある場合を検討した(図3参照)。例えば、キャパシタンスに1.4オームの損失があった場合、「最大左旋円偏波放射に対する放射効率は、損失のない場合の22%から16%へと減少する」。一方、「最大右旋円偏波放射に対する放射効率は、損失のない場合の14%から8%へと減少する」ことがわかった。また、インダクタンス及びキャパシタンスの損失による放射パターンへの影響が少ないこともわかった。

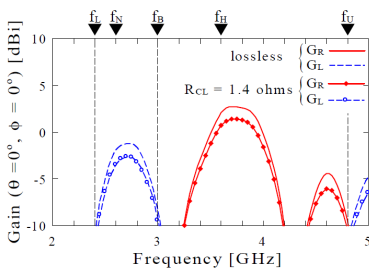


図3 損失を考慮した利得の周波数特性

## (2) 単線角型スパイラルアンテナ

本アンテナは低姿勢(0.016波長)でバランスを必要としていない(図4参照)。図5に示すように、「スパイラルアンテナは、通常のものとは異なり、異なった周波数に於いて右旋円偏波と左旋円偏波を放射する」ことが判った(図5参照)。このとき、約7%の周波数帯域内で、安定した軸比と利得が得られていた。

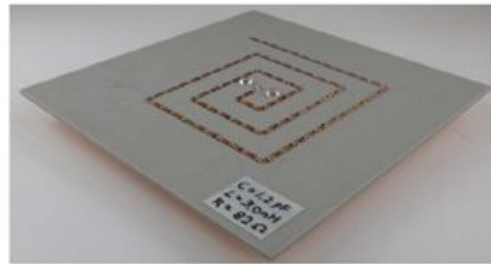


図4 試作単線メタスパイラルアンテナ

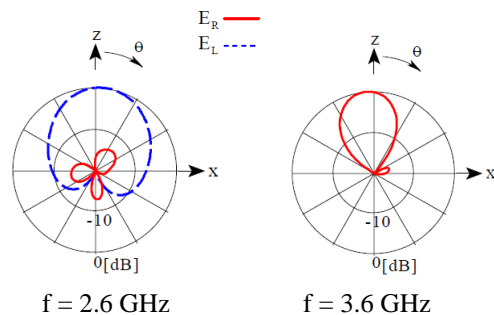


図5 放射パターン

## (3) 2線角型スパイラルアンテナ

### 直線偏波放射

2重円偏波放射の起こる周波数から離脱した周波数において、直線偏波放射を得るために、電流位相を検討した。「スパイラル形状のアンテナとループ形状のアンテナにおいては、電流位相定数が0となる周波数で、直線偏波放射が得られる」ことが明らかになった。さらに、次の点も示すことができた。(1)角形スパイラルアンテナにおいては、アーム素辺数を変化させることにより、直線偏波の方位角が制御でき、水平・垂直偏波が得られる(図6参照)。(2)ループ形状アンテナに

においては，異なった周波数で，水平偏波と垂直偏波が得られる．

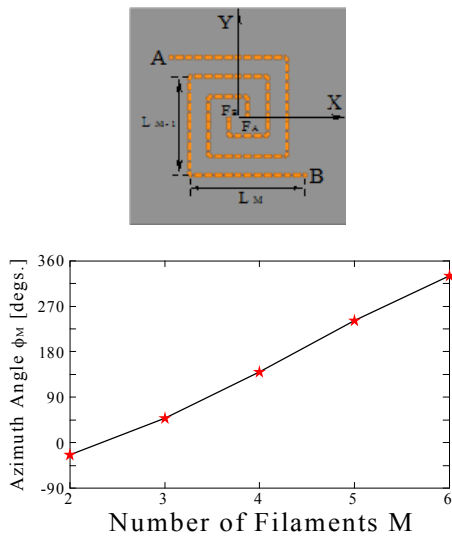


図 6.直線偏波制御

#### 円偏波周波数の分離

2線スパイラルアンテナの辺数を変化させ，両偏波周波数分離( $f_H - f_N$ )を検討した．その結果，「スパイラルアンテナの辺数を増加させると，両偏波周波数分離度は減少し，右旋円偏波利得と左旋円偏波利得は増大する」ことが判った (図 7 参照)．

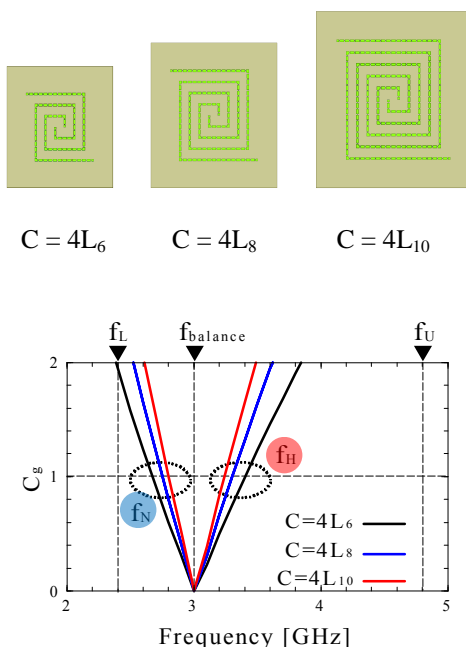


図 7 周波数分離度

2周波反円偏波アンテナの利得  
左手系の特性を有するスパイラルアンテナでは，左旋円偏波利得と右旋円偏波利得の値に違いが生じる．本研究では，スパイラルアンテナ上部に誘電体スラブを設置し，両利得を近づける検討を行った．「誘電体スラブを設置することにより，低域での左旋円偏波利得は増加し，右旋円偏波利得に近くなる」ことを明らかにした (図 8 参照)．

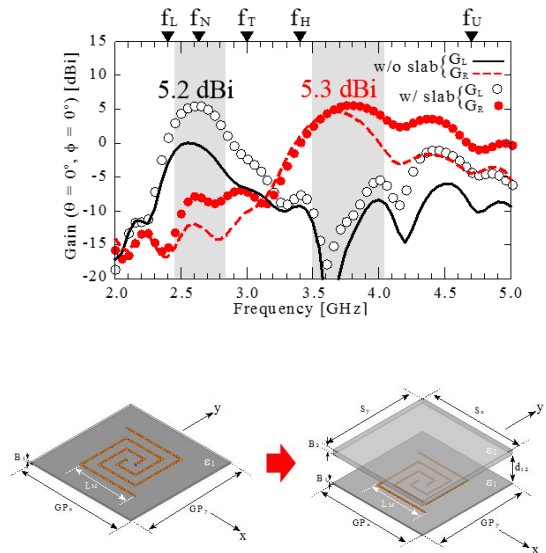


図 8 同利得特性

#### 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 2 件)

H. Nakano, K. Yoshida and J. Yamauchi, “Radiation characteristics of a metaloop antenna,” IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 査読有, vol. 12, pp. 861-863, 2013

DOI: 10.1109/LAWP.2013.2271419

H. Nakano, J. Miyake, T. Sakurada, and J. Yamauchi, “Dual-band counter circularly polarized radiation from a single-arm metamaterial-based spiral antenna,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 査読有, vol. 61, no. 6, pp. 2938-2947, 2013

DOI: 10.1109/TAP.2013.2250233

〔学会発表〕(計 19 件)

吉田 (健), 山内, 中野, “誘電体スラブ装荷メタループアンテナ,” 電子情報通信学会総合大会, B-1-85, 2015 年 3 月 12 日, 立命館大学びわこ・くさつキャンパス (滋賀県草津市野路東)

清水, 山内, 中野, “誘電体スラブのメタスパイラルへの効果,” 電子情報通信学会総合大会, B-1-90, 2015 年 3 月 12 日, 立命館大学びわこ・くさつキャンパス (滋賀県草津市野路東)

吉田 (健), 山内, 中野, “2 バンド反円偏波角型楕形状ループアンテナの実験検討,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, BCS-1-14, 2014 年 9 月 25 日, 徳島大学常三島キャンパス (徳島県徳島市南常三島町)

吉田 (朋), 山内, 中野, “メタループアンテナの誘電体効果,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-72, 2014 年 9 月 25 日, 徳島大学常三島キャンパス (徳島県徳島市南常三島町)

小林, 山内, 中野, “1 線給電直線偏波メタループアンテナ,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-71, 2014 年 9 月 25 日, 徳島大学常三島キャンパス (徳島県徳島市南常三島町)

三浦, 山内, 中野, “メタループアンテナ (第三報),” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-70, 2014 年 9 月 25 日, 徳島大学常三島キャンパス (徳島県徳島市南常三島町)

H. Nakano, T. Shimizu, H. Kataoka, and J. Yamauchi, “Circularly and linearly polarized waves from a metamaterial spiral antenna,” 2014 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), 査読有, pp. 535-536, Memphis, Tennessee, USA, 2014 年 7 月 8 日

DOI: 10.1109/APS.2014.6904599

H. Nakano, H. Kataoka, T. Shimizu, and J. Yamauchi, “Two-arm metasprial antenna,” 2014 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 査読有, pp. 788-790, Hague, Netherlands, 2014 年 4 月 8 日

DOI: 10.1109/EuCAP.2014.6901878

門馬, 山内, 中野, “メタヘリカルアンテナのピッチ長特性,” 電子情報通信学会総合大会, B-1-152, 2014 年 3 月 19 日, 新潟大学 (新潟県新潟市西区五十嵐)

田中, 山内, 中野, “メタヘリカルアンテナの巻数効果,” 電子情報通信学会総合大会, B-1-151, 2014 年 3 月 19 日, 新潟大学 (新潟県新潟市西区五十嵐)

片岡, 山内, 中野, “メタループアンテナ反円偏波周波数の分離,” 電子情報通信学会総合大会, B-1-150, 2014 年 3 月 19 日, 新潟大学 (新潟県新潟市西区五十嵐)

清水, 山内, 中野, “2 線式メタスパイラルアンテナからの直線偏波放射,” 電子情報通信学会総合大会, B-1-149, 2014 年 3 月 18 日, 新潟大学 (新潟県新潟市西区五十嵐)

吉田, 山内, 中野, “2 バンド反円偏波角型ループアンテナの高さ特性,” 電子情報通信学会総合大会, B-1-122, 2014 年 3 月 18 日, 新潟大学 (新潟県新潟市西区五十嵐)

H. Nakano, K. Yoshida, and J. Yamauchi, “Dual-band metaloop antenna,” 2014 International Workshop on Antenna Technology (iWAT), 査読有, pp. 262-265, Sydney, Australia, 2014 年 3 月 5 日

DOI: 10.1109/IWAT.2014.6958654

清水, 山内, 中野, “2 線式メタスパイラルアンテナの偏波について,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-78, 2013 年 9 月 17 日, 福岡工業大学 (福岡

県福岡市東区)

片岡, 山内, 中野, “メタスパイラルアンテナの辺数特性,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-77, 2013年9月17日, 福岡工業大学(福岡県福岡市東区)

吉田, 山内, 中野, “2バンド反円偏波角型ループアンテナの実験検討,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-73, 2013年9月17日, 福岡工業大学(福岡県福岡市東区)

H. Nakano, K. Yoshida, J. Miyake, and J. Yamauchi, “Counter circularly-polarized loop antenna,” 2013 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI National Radio Science Meeting, 査読有, pp. 152-153, Orlando, Florida, USA, 2013年7月8日

DOI: 10.1109/APS.2013.6710737

H. Nakano, Y. Okuyama, J. Miyake, and J. Yamauchi, “Counter circularly-polarized curl antenna with a lossy structure,” 2013 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI National Radio Science Meeting, 査読有, pp. 154-155, Orlando, Florida, USA, 2013年7月8日

DOI: 10.1109/APS.2013.6710738

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中野 久松 (NAKANO, Hisamatsu)  
法政大学・理工学部・教授  
研究者番号: 00061234

### (2) 連携研究者

三牧宏彬 (MIMAKI, Hiroaki)  
法政大学・理工学部・専任講師  
研究者番号: 60120838