

## 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 24 年 5 月 23 日現在

機関番号：32675

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560416

研究課題名（和文） 超小型アンテナの理論構築と実現化

研究課題名（英文） Theory construction and realization of an extremely small antenna

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

研究成果の概要（和文）：

任意の形状から成る超小型アンテナを対象とし、その放射特性を導出するための理論を構築した。その際、アンテナ導体上を流れる電流に関して、ひとつの積分方程式を定式化した。この方程式の積分核は、微分演算や積分演算を含まない形に整理されている。それゆえ、取り扱いが簡単であり、計算時間が短縮できる利点をもつ。スパイラル形状に適用し、モーメント法により解を得た。得られた結果をもとに、超小型スパイラルアンテナを実現している。

研究成果の概要（英文）：A theoretical method for calculating the characteristics of an extremely small antenna with an arbitrarily shaped structure has been established, where an integral equation is formulated for the current along the antenna conductor. The kernel of this equation does not include calculations of derivatives and integrations, thereby leading to easy treatment with a reduced computation time. The integral equation has been applied to a spiral structure and solved using the method of moments. Based on the obtained results, an extremely small spiral antenna has been realized.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：アンテナ

## 1. 研究開始当初の背景

電子デバイスの小型化が進んでいる。アンテナもまた例外ではない。小型アンテナ（最

大構造値  $L$  が  $1/8$  波長以下のものと定義) の研究は、国内外で、近年、特に活発に行われている。その背景には、携帯電話、無線情報

機器、多機能モバイル機器、医療用移動型内視鏡ユニットなどの小型化があげられる。これらの機器に設置されるアンテナは、設置場所の制約(小さいスペース)から、必然的に、小型でなければならない。

アンテナの小型化についての理論検討は、Chu に始まり (1948 年, 米国), その後, Harrington (1960 年, 米国), Collin (1964 年, 米国), Fante (1969 年, 米国), Wheeler (1975 年, 米国) 等により検討されてきた。Chu 理論は小型アンテナの Q 値(quality factor)に言及したものであり、これはアンテナの動作帯域を論じる上で、重要な因子となる。しかしながら、最近、Mclean は「Chu 理論はごく限られた小型アンテナにしか適用できない」と指摘し、Chu 理論の限界に言及している (1996 年, 米国)。

Mclean による指摘は、短い直線状アンテナに注目して行われているが、中野(本研究者)は、この Mclean の理論展開のなかに近似を見出している。換言すれば、Mclean 理論もまたアンテナ最大構造値 L の制限を受けるので、小型アンテナを実現する観点からは、有効性が低い。

## 2. 研究の目的

本研究では、最大構造値 L の制約をうけない一般化された理論を構築し、アンテナの小型化について基本原理を明らかにしていく。さらに、本研究では、この原理を応用し、実際に耐え得る超小型アンテナを実現していく。その際、超小型アンテナ構造における最大構造値 L を 1/100 波長程度とする。現存する 1/4 波長アンテナに対して 1/25 程度に超小型化されることになる。このような超小型アンテナは、特に、情報通信分野において、有効な電子デバイスとして使用できる。

## 3. 研究の方法

本研究では、実際の小型アンテナ(有限構造)に対して、放射特性を厳密に導出できる理論(したがって動作可能周波数を厳密に評価できる理論)の構築を遂行する。その際、アンテナ最大構造値 L の制約をうけないように理論を展開する。小型アンテナに対する理論の厳密化、一般化のために、任意線状アンテナ導体上に分布する真の電流(近似電流ではない)を積分方程式の形で定式化する。この積分方程式の核を、微分積分演算を含まない形式で導出する。導出された積分方程式をモーメント法(数値解法の一つ)により解き、任意線状アンテナ導体上の真の電流を導出する。

実際のアンテナでは、どんなに構造が小型であっても、有限の長さ、あるいは体積をもち、アンテナ導体上の各点と、電磁界を観測する点までの距離が異なる。従って、位相を考慮し、小型アンテナからの電磁界を定式化する必要がある。その際、任意構造の線状アンテナが多数の線素から成ることに注目し、各々に、局所座標を使用して、電磁界を導出する。通常の座標(直交、円筒、球座標)を使用した場合、電磁界の導出は複雑であり、結果として得られる式も複雑になる。この複雑性を回避し、電磁界を導出する。さらに、電流の厳密値に基づき、使用可能な小型アンテナ(最大構造値 L が 1/100 波長程度)を実現する。

線状アンテナは、共振形アンテナ、非共振形アンテナに分類できる。共振形アンテナは 1/4 波長の整数倍の導体長から成り、その導体の形状は、一般には、直線状になっている。他方、非共振形アンテナでは、長さ一波長以上の導体が、折り線状あるいは曲線状に構成されている。これらのアンテナの最大構造値 L は、本研究が取り扱う 1/100 波長程度

のものと比べるとかなり大きい。逆に言えば、本研究では、アンテナ最大構造値 $L$ が従来の1/25程度と極めて小さい。

本研究では、スパイラル線状導体を3次元に配線することにより超小型アンテナを構成していくが、このような超小型アンテナでは、放射インピーダンスを高めることが極めて困難であり、実用化が難しいとされている。この問題を電磁結合によって解決する。

#### 4. 研究成果

小型アンテナに対する一般化された積分方程式を導出した。この方程式をスパイラル形状の小型アンテナに適用し、理論解析をおこなった。実験を行い理論の正当性を確認し、学会等に論文を公表している。研究成果の概略を以下に示す。

(1) 小形スパイラルを形成する過程における入力インピーダンスを、折り曲げ回数を変数として解析した(図1参照)。最終のアンテナの占有体積は0.0362波長×0.0346波長×0.0354波長と極めて小さい。図2に解析結果を示す。アーム折曲に伴い共振周波数が高域に推移することを明らかにした。

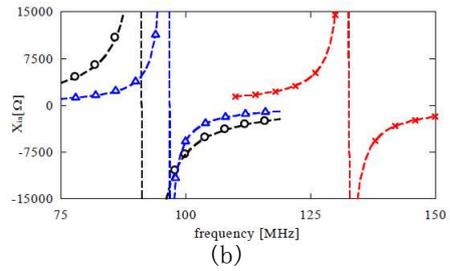
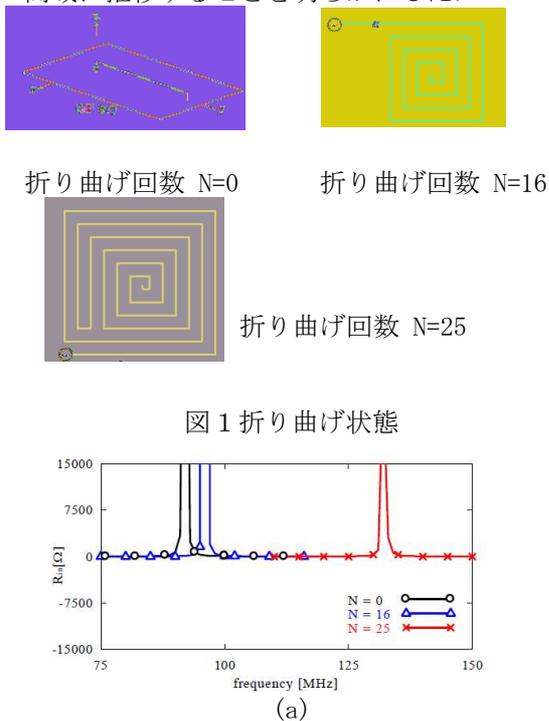


図2 入力インピーダンス.

(a) 抵抗 $R_{in}$ . (b) リアクタンス $X_{in}$ .

(2) 平面形状スパイラルを直角に折り曲げた場合の放射特性を検討した。図3に構造を示す。最外のアームの一辺は約0.02波長、高さは0.016波長と極めて低い。折り曲げによる放射パターンへの影響は少ないといえる。図4に入力インピーダンス特性を示す。共振周波数が高域に移動することを明らかにした。

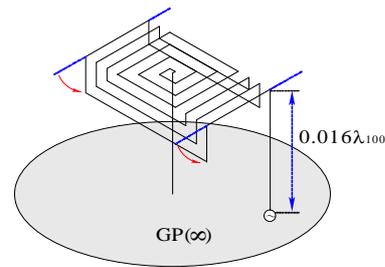


図3 直角折曲スパイラル

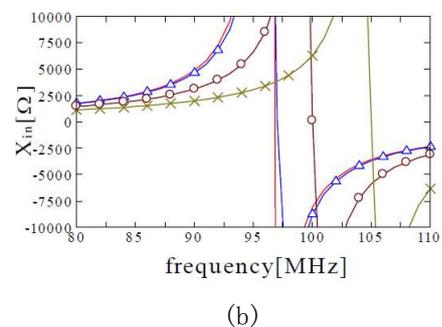
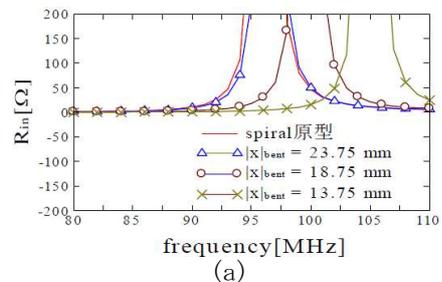


図4 入力インピーダンス.

(a) 抵抗 $R_{in}$ . (b) リアクタンス $X_{in}$ .

(3) モノポールで給電された電磁結合小形角型スパイラルアンテナを調査した. 図5に構造を示す. 使用したアンテナの占有体積は  $0.016$  波長 $\times 0.015$  波長 $\times 0.0003$  波長と極めて小さい. スパイラルの終端Pを短絡した場合と開放した場合の放射特性を考察した. 図6に放射パターンを示す. スパイラルの終端を開放した場合, 短絡した場合に比べ, 直交成分が少なくなることを明らかにした.

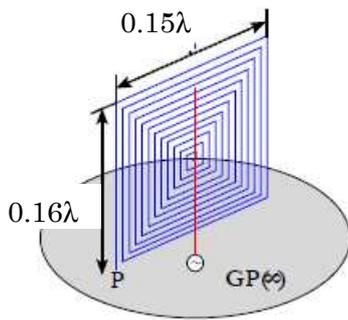


図5 電磁結合小型スパイラルアンテナ

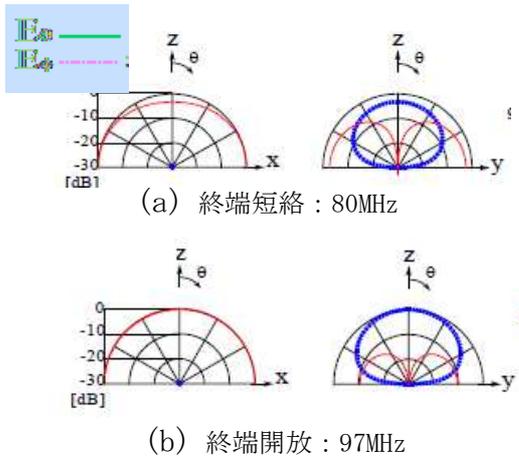


図6 放射パターン.

(a) 終端短絡. (b) 終端開放.

(4) 平面形状2線式丸型スパイラルアンテナの給電部付近に容量を装荷した場合の入力インピーダンスを明らかにした. 使用したスパイラルアンテナの直径  $D$  は,  $0.016$  波長と極めて小さい. 高さ  $h$  は  $0.01027$  波長と超低姿勢となっている. 給電部付近に適切な

容量を装荷することにより, 入力インピーダンスのリアクタンス成分がゼロとなることを示した. さらに, 入力インピーダンスの周波数特性を解析し, 入力抵抗の変化量が少なくなる周波数範囲を明らかにした. 本解析の範囲内で, 入力抵抗の変化量は  $24\Omega$  であった.

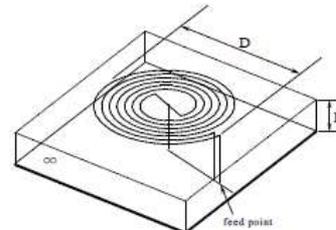


図7 構造

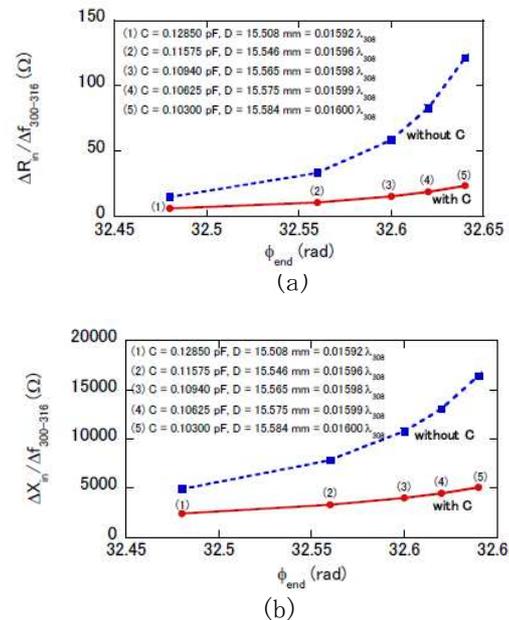


図8 入力インピーダンスの変化量  
(a) 抵抗  $R_{in}$  の変化量  
(b) リアクタンス  $X_{in}$  の変化量

(5) 本研究の延長上における新発見. 「メタマテリアルスパイラルでは, アンテナ高を  $1/100$  波長程度にしても, 円偏波が発生する」との知見を得た.

従来のスパイラルアンテナは, 左回転円偏波または右回転円偏波のいずれか一つを特定の方向に放射する. 換言すれば, スパイラルの巻き方向に対応して, 単一回転円偏波を発生するにすぎない. 本研究の延長上で, 2

つの円偏波を発生させることを試みた。ただし、アンテナの高さのみを1/100波長程度に選んだ。このアンテナをメタマテリアルスパイラルとよぶ。

最初に、電流帯理論を用いて、放射原理を考察し、2重回転円偏波放射を予想した。つぎに、この予想に基づき、1つのアンテナモデルを構築した。これを図9に示す。「多数の直線状素子がアンテナアームを構成し、各素子は周期的に分割され、左手系特性を持つようになっている」ことが特長である。計算は予想した結果を示した。図10に示すように、低姿勢状態で2重回転円偏波放射が達成できた。

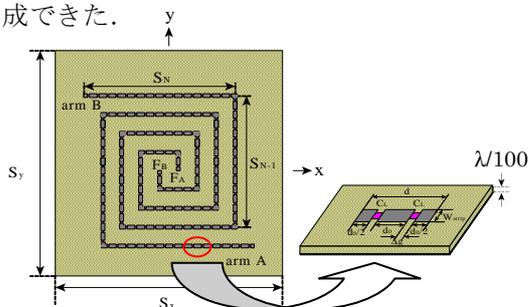
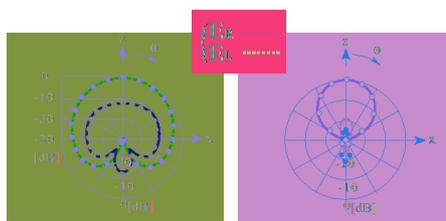


図9 メタマテリアルスパイラル



(a)  $f = 2.6$  GHz (b)  $f = 3.7$  GHz

図10 放射パターン

## 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 1件)

- ① H. Nakano, J. Miyake, M. Oyama, and J. Yamauchi, “Metamaterial spiral antenna,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 10, pp. 1555-1558, 2011年1月30日 (査読有)

[学会発表] (計 9件)

- ① 櫻井, 山内, 中野, “モノポール給電小型スパイラルアンテナ,” 電子情報通信学会総合大会, B-1-137, 岡山大学, 工学部 一号館 第5講義室, 2012年3月22日
- ② 三牧, 中野, “小形2線式スパイラルアンテナの放射特性,” 電子情報通信学会総合大会, B-1-138, 岡山大学, 工学部 一号館 第5講義室, 2012年3月22日
- ③ H. Nakano, J. Miyake, Y. Oishi, H. Oyanagi, and J. Yamauchi, “An electromagnetic metamaterial spiral antenna,” 2011 International Symposium on Antennas and Propagation, ISAP, ThB1-2, Korea, 2011年10月27日 (査読有)
- ④ 櫻井, 山内, 中野, “超小型スパイラルアンテナ,” 電子情報通信学会総合大会, B-1-141, 東京都市大学, 世田谷キャンパス6号館633, 2011年3月16日
- ⑤ 岡田, 山内, 中野, “スパイラル構造を有する小形アンテナ,” 電子情報通信学会総合大会, B-1-143, 東京都市大学, 世田谷キャンパス6号館633, 2011年3月16日
- ⑥ 宇塚, 山内, 中野, “超低姿勢カールアンテナ,” 電子情報通信学会総合大会, B-1-97, 東北大学, 川内キャンパス講義棟B棟B201, 2010年3月18日
- ⑦ 岡田, 山内, 中野, “スパイラル形状を用いた小形アンテナ,” 電子情報通信学会総合大会, B-1-95, 東北大学, 川内キャンパス講義棟B棟B201, 2010年3月18日
- ⑧ 岡田, 山内, 中野, “スパイラル小型アンテナ,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-116, 大阪府立大学, 中百舌

鳥キャンパス, 教育機構 B3 棟 117, 2010  
年 9 月 15 日

- ⑨ 吉田, 山内, 中野, “超小型スパイラル  
アンテナ,” 電子情報通信学会総合大会,  
B-1-109, 愛媛大学, 城北地区工学部講義  
棟 3F 33 番講義室, 2009 年 3 月 17 日

## 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) 研究分担者

三牧 宏彬 (MIMAKI HIROAKI)

法政大学・理工学部・専任講師

研究者番号 : 60120838