

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：22303

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13760

研究課題名(和文)折り紙的発想による超小型高性能折り畳みアンテナの開発

研究課題名(英文)Realization of an extremely small high performance antenna using origami structure

研究代表者

藤田 佳祐 (Fujita, Keisuke)

前橋工科大学・工学部・助教

研究者番号：90804857

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：小型化と高性能を両立する折りたたみ機構を立体的な形状の小形アンテナに適用することを目指して研究を行った。球面上で最も放射効率が高くなる電流分布をもとに、実際に製作することが可能な導体ワイヤで構成されるアンテナを提案した。
折りたたみと展開が可能な現実的な機構を明らかにし、折りたたみ時と使用時の挙動について理論的な裏付けをもって解明することができた。研究の成果は理論的な結果にとどまらず、数値シミュレーションや実測による測定によって検証も行うことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義：従来見過ごされてきた立体的なアンテナの折り畳みに注目することで、小型化と高効率を両立する従来にない超小形アンテナの実現可能性を解明することができた。
社会的意義：災害救助用のビーコン用アンテナなど、サイズの制限が厳しい中で少しでも強い電波を送り届けることに応用可能な折り畳みアンテナの提案と理論の定式化を行うことができた。さらに、とその結果の検証を行うことで将来の応用の可能性を高めることができた。

研究成果の概要(英文)：The aim of this research is to find a novel structure of small antenna which achieve both high performance and small size. The proposed structure is a helical antenna supported by Origami-like folding structure. We proposed and fabricated an antenna whose current distribution can approximate the theoretically optimal result. The antenna was fabricated by a wire conductor. We analyzed the proposed antenna when the folding mechanism is unfolded. The results were explained by the theory developed in this research and verified by numerical simulation and measurements.

研究分野：アンテナ工学

キーワード：小形アンテナ 放射効率 Q値 理論限界 アンテナ理論 折りたたみアンテナ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

個人が携帯できる救助用ビーコンを実現する際に、電磁波の波長に対してアンテナサイズを小さくする必要がある。しかし、アンテナを小型化すれば性能の劣化が問題となり、理論的境界が知られている。アンテナの小型化に伴って代表的な性能指標である帯域幅(Q 値)や放射効率(アンテナに供給された電力のうち空間に放射される電力の割合)が劣化し、小形アンテナの性能に上限があることが解明されてきた。つまり、一定の性能を持ったままのアンテナ小型化には根本的境界がある。

このように、小形アンテナのサイズに対して性能の上限は制約されている。したがって、アンテナ使用時は性能境界の理論に基づいたアンテナ性能(放射効率や帯域幅)を確保するために最低限のサイズが必要である。一方で、使用していない場合にはアンテナを立体折り紙のように折り畳むことができるという点は注目に値する。

上記の背景から、展開時には立体的形状アンテナで「理論境界に迫る高性能」を発揮し、折り畳めば「超小型」になるアンテナが実現できるはずである。しかし、これまでにアンテナ展開時のサイズが小さくかつ折り畳みも容易であるような高性能小型アンテナは知る限り皆無であった。折り畳み立体アンテナを開発することにより図 1 に示すように小型ビーコン等への内蔵を可能にするだけでなく、従来型のアンテナでは搭載スペースが少なく条件を満たせない状況に対応することも可能になると考えた。

2. 研究の目的

以上の背景を踏まえ本研究の目的は、

- (1) 展開時のアンテナ形状と折り畳み方式が性能に及ぼす影響の評価
- (2) 折り畳みアンテナの展開段階ごとに変化する性能の評価
- (3) アンテナを実際に使用する際に受ける影響についての評価

を理論モデルの構築、シミュレーション及び試作を通して行うことによって小型と高性能を両立する折り畳みアンテナを実現することである。

3. 研究の方法

(1) モデルの構築：球面・球ヘリカルアンテナに関する基礎理論

本研究の高性能アンテナは、これまで研究されてきた球面アンテナ及び球ヘリカルアンテナをベースとして開発を目指す。したがって、折りたたみアンテナへすすむ前段階として、球面・球ヘリカルアンテナの性能に対する基礎研究を解析的な手法を用いて行う。

(2) シミュレーション：円筒ヘリカルアンテナの開発

高性能を実現するため、折り紙に発想を得た容易に折り畳める形状の表面に、形状が類似している球面アンテナモデルの理論境界にできるだけ近い電流分布を実現する。この円柱形状の設計を調整しながらアンテナによる放射特性をシミュレーションにより確認する。

(3) 実測・シミュレーション：円筒ヘリカルアンテナの折りたたみ

アンテナが収納時に折りたたみ状態であり、使用時に展開されることを踏まえて、折りたたみ時及び使用時の性能をシミュレーション及び実測を用いて検証する。

4. 研究成果

(1) 球面・球ヘリカルアンテナに関する基礎理論

折りたたみアンテナの開発の前段階として、球面球ヘリカルアンテナに関する基礎理論の構築を行った。これは、展開時の折りたたみアンテナの性能を推定し、評価するのに役立つことが期待されるからである。

図 2 に球面アンテナの実効 Q 値の計算結果を示す。球面全体から放射する理論モデルから、アンテナが小さいときに問題となる実効 Q 値を計算した。その結果、非常にアンテナサイズが小さいときは、従来知られていた微小ダイポールやループの結果に近くなることがわかった。ま

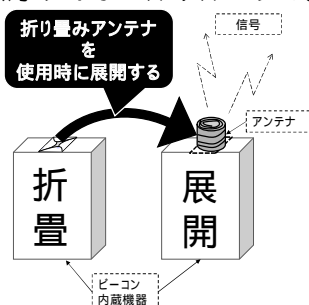


図 1 小形アンテナとそれを利用するビーコン

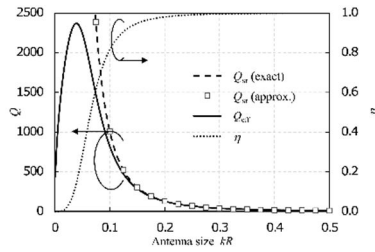


図 2 球面アンテナの実効 Q 値

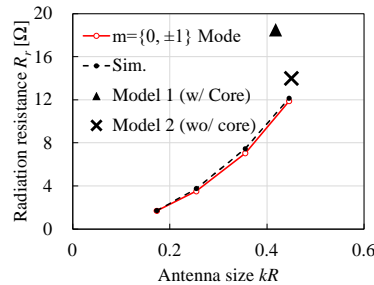


図 3 球ヘリカルアンテナの放射抵抗

た，実際に実現可能なサイズでは，無損失の場合と比べて，大きな変化はないことがわかった．その中間のサイズでは，特別な取り扱いが必要であることが示唆される結果を得た．この結果から，折りたたみアンテナの目指すべき Q 値の目標を明らかにすることができた．

図 3 にワイヤで構成される球ヘリカルアンテナの放射抵抗に関する解析結果を示している．理論モデル，シミュレーション結果，および実測結果をプロットしており，相互に近い結果になることがわかった．実効 Q 値の場合よりもより現実に近い理論モデルを提案した．そのモデルは，半波長程度の導体ワイヤに正弦波形状の電流分布を仮定し，その放射電力を球面波展開で解析した．結果から，従来知られていたシミュレーション結果を理論的に説明することができ，球ヘリカルアンテナの形状パラメータが放射抵抗にどのように寄与するのか明確に示すことができた．結果は折りたたみアンテナの実際の設計をする際に，放射抵抗の目安として活用することが期待される．

(2) 円筒ヘリカルアンテナの開発

高性能な球ヘリカルアンテナを基にして，図 4 に示すような折りたたみ可能な円筒ヘリカルアンテナを提案した．円筒ヘリカルアンテナは球面ヘリカルアンテナの特徴である，電流の成分比が一定という特徴を引き継ぎ，側面と上下面で電流成分の変化が小さくなるよう設計した．従って，円筒ヘリカルアンテナは従来の球ヘリカルアンテナに近い性能を持つことが期待される．また，折りたたみ可能な形状として円筒を採用した．

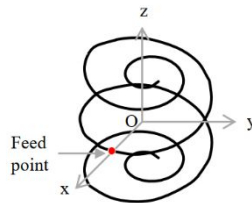


図 4 円筒ヘリカルアンテナ

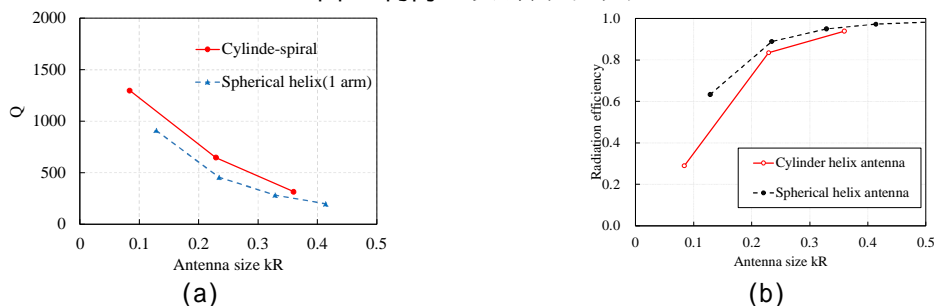


図 5 円筒ヘリカルアンテナと従来のヘリカルアンテナの性能比較

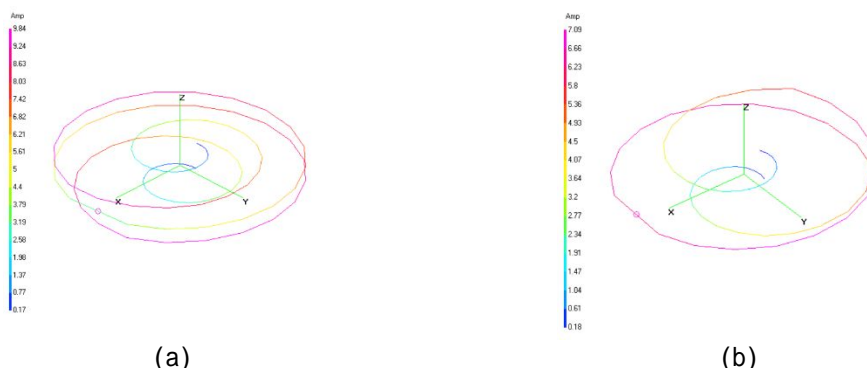
数値シミュレーションを用いて、球ヘリカルアンテナと円筒ヘリカルアンテナの性能比較を行った。図 5(a)に Q 値の比較を示している。この結果から、球ヘリカルアンテナよりも円筒ヘリカルアンテナの Q 値は若干大きくなるが、球ヘリカルアンテナに近い性能を持つことが期待される。同図(b)に放射効率の比較を示している。この図から、放射効率も円筒ヘリカルアンテナと球ヘリカルアンテナは近い結果になることがわかる。したがって、円筒ヘリカルアンテナは従来よりも高性能な小型折りたたみアンテナとなることが期待される。

(3) 円筒ヘリカルアンテナの折りたたみ

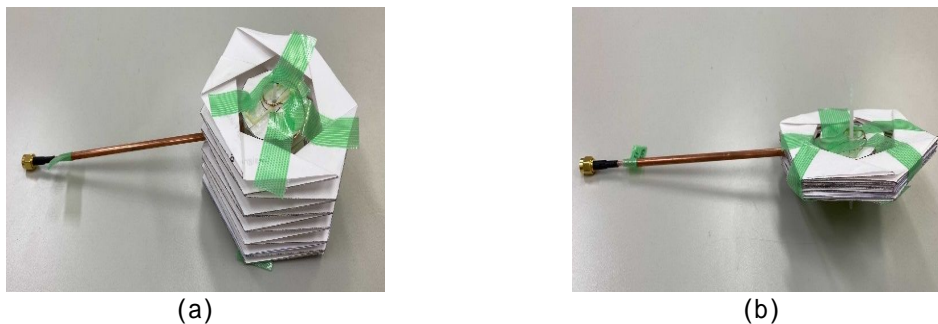
円筒ヘリカルアンテナの折りたたみによる影響を評価するために、シミュレーション及び実測を行った。折りたたみ時の電流分布についてシミュレーション結果を図 6 に示す。折りたたみによって、電流が周辺部に集中することから、ループアンテナに近い特性を持つことが示唆される結果となった。

実際にアンテナを実現するための検討を行い、アンテナを製作した。アンテナを実現するためには、給電ケーブルのインピーダンスと整合させる形状が必要である。そこで、給電ループを設置し、間接的に給電することで、折りたたみへの対応と整合を同時に実現する構造を提案した。さらに、アンテナの実装では円筒ヘリカル部分と給電ループを支持する物体が必要である。そのため、図 7 に示す円筒ねじり折り構造の指示部材を開発した。材質は紙であり共振周波数等の放射特性への影響を最小に抑えることができた。図 7 に示すアンテナを電波暗室にて測定した結果、リターンロス特性がシミュレーションに近い結果となった。

以上から、この研究によってビーコン等での利用が想定される小型でありながら高性能の折りたたみ可能アンテナを設計することに成功した。



(a) (b)
図 6 円筒ヘリカルアンテナの折りたたみ時における電流分布



(a) (b)
図 7 折り紙構造によって支持された折りたたみ円筒ヘリカルアンテナ

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 藤田 佳祐、野口 啓介	4. 巻 J103-B
2. 論文標題 高い放射効率をもつ小型円筒ヘリカルアンテナ	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌B 通信	6. 最初と最後の頁 528 ~ 537
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14923/transcomj.2020APP0003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Fujita Keisuke	4. 巻 9
2. 論文標題 Effective Q factor formula for small spherical surface antennas	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 111 ~ 116
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/comex.2019XBL0158	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Keisuke Fujita	4. 巻 -
2. 論文標題 High-order Spherical Modes Analysis for Small Spherical Helix Antennas	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. of Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2018)	6. 最初と最後の頁 CD-ROM
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Keisuke Fujita	4. 巻 -
2. 論文標題 Elliptically Polarized Compact Cylinder-Spiral Antenna	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. of 2018 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA)	6. 最初と最後の頁 CD-ROM
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/CAMA.2018.8530491	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 6件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 藤田佳祐
2. 発表標題 小形球ヘリカルアンテナの放射効率に関する解析表現
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上瀬亮, 藤田佳祐
2. 発表標題 円筒ヘリカルアンテナの折り畳みシステムに関する研究
3. 学会等名 電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤田佳祐
2. 発表標題 小形球ヘリカルアンテナの放射抵抗
3. 学会等名 電子情報通信学会 ソサイエティ大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤田佳祐
2. 発表標題 [チュートリアル講演]球面波展開を用いた最適小型アンテナの解明と実現
3. 学会等名 電子情報通信学会アンテナ伝搬研究会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤田佳祐
2. 発表標題 折りたたみ円筒スパイラルアンテナの放射効率解析
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keisuke Fujita
2. 発表標題 Excitation of Eigenmode Current for Multiple Resonance Antenna
3. 学会等名 2019 URSI International Symposium on Electromagnetic Theory（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤田佳祐
2. 発表標題 円柱ヘリカルアンテナの放射効率に関する基礎検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 ソサイエティ大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Muhammad Syafiq bin Shahidan, 藤田 佳祐
2. 発表標題 機械学習を用いたアンテナ設計支援システムの開発に関する基礎検討
3. 学会等名 情報処理学会 全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤田佳祐
2. 発表標題 複数の周波数で共振する球面アンテナに関する基礎検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 総合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keisuke Fujita
2. 発表標題 High-order Spherical Modes Analysis for Small Spherical Helix Antennas
3. 学会等名 Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Keisuke Fujita
2. 発表標題 Elliptically Polarized Compact Cylinder-Spiral Antenna
3. 学会等名 2018 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (2018 IEEE CAMA) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Keisuke Fujita
2. 発表標題 Recent Development of Electrically Small Spherical Helix Antennas
3. 学会等名 12th Asia-Pacific Engineering Research Forum on Microwaves and Electromagnetic Theory (APMET 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤田佳祐
2. 発表標題 小型アンテナにおける放射効率限界の近似表現
3. 学会等名 電気関係学会四国支部連合大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関