

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 29 日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420356

研究課題名(和文) 導電性織物を用いた柔らかい構造をもつウェアラブルアンテナの開発

研究課題名(英文) Development of flexible wearable antennas using conductive textiles

研究代表者

島崎 仁司 (Shimasaki, Hitoshi)

京都工芸繊維大学・電気電子工学系・准教授

研究者番号：20226202

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：導電性の繊維を含んだ織物を使って、形状を変えられる柔らかい構造の高周波アンテナを設計・作製し、曲げた場合の特性を測定・解析した。そして設計の計算時間を短縮できる等価回路モデルを示すとともに、アンテナを曲げた場合の問題点を示し、その原因、解決策について検討した。また、身体あるいは物体の近傍に置いて使用しても特性の変化が少ないアンテナを提案した。得られた成果は、ウェアラブルアンテナの新たな一つの可能性を与えるものであり、これまでに使われているウェアラブル機器がさらに広く使用されるようになるために有用なものである。

研究成果の概要(英文)：Flexible microwave and uhf antennas that are made of conductive textiles have been designed and fabricated, and their characteristics have been measured in bending and flat cases. An equivalent circuit model was presented for shorter designing time. Operation problems in bending case and their solution were also presented together with their cause. In addition, a magnetic type small antenna whose characteristics were affected little by items or the human body in the vicinity was proposed. The results obtained in this research would show new potential of wearable antennas and be useful for designing wearable electronic devices.

研究分野：通信工学

キーワード：アンテナ 導電性織物 ウェアラブルデバイス マイクロ波 キャパティ RFID インピーダンス整合  
等価回路

## 1. 研究開始当初の背景

ワイヤレス通信システムにおいて、アンテナは端末機器の中でも重要な素子である。モバイル機器端末は多くの場合、身体に装着できるぐらいにまで小型化されることが望まれる。しかし技術面から見るとアンテナは小型化するほど性能は劣化し、そのため通信機器全体の仕様を厳しくしている。アンテナの大きさを保持して性能を向上させることにより、機器全体の性能を上げることができる。従来、アンテナは硬いものでその形状を変えられるようなものではなかった。しかし今後、RFID タグのように種々の形状の物品に装荷できるもの、あるいはユビキタスネットワーク社会におけるモバイル端末機器の普及により、身体に装着できる(衣服として着ることのできる、ウェアラブル)アンテナが望まれる。また、医療やヘルスケアに応用されるボディエリアネットワークにおいてもウェアラブルアンテナは鍵となる素子である。

ウェアラブルアンテナとしては、例えば導電性織物を使ったマイクロストリップパッチアンテナが報告され、それを折り曲げたときの反射特性などが示されている。但しこれは導電性の生地を縫製してアンテナパターンを構成しており、その他国内外の報告も同様である。研究代表者はスロットアンテナを導電性織物を使って作製し、その基本特性を明らかにした。これまで、導電性織物の織り方や糸の構造がアンテナ特性に与える影響を明らかにした研究は少数である。その中で、研究代表者は伝統技法を用いた金属糸による導電性織物の高周波特性を明らかにして2009年に報告した。本研究課題はこの成果ならびに先述のアンテナに関する研究成果を活かし、導電性織物を使ったアンテナを設計する際、ならびに曲げて使用する際の問題点を明らかにし、その解決法を見出して、柔らかい構造のアンテナの開発に有用な資料を与えようとするものである。

また、導電性繊維生地はアンテナだけでなく、電磁シールド材を構成することにも用いることができ、高周波回路としての特性を知ることが、さらに応用分野を広げることにも有用である。

## 2. 研究の目的

導電性の繊維を含んだ織物を使って、形状を変えられる柔らかい構造の高周波アンテナを設計・作製し、曲げた場合等の特性を測定・解析する。

情報端末機器は小型・軽量化が進められているが、無線機器において重要な素子であるアンテナは小型化するほど性能が劣化する。本研究は、大きさを保持したまま身に着ることができる(着られる)アンテナを導電性織物を使って実現し、例えば商品識別・管理システムの基幹デバイスであるRFID タグ、あるいは医療・ヘルスケアに応用が進められているボディエリアネットワークといったユ

ビキタスネットワークのより広い実現と普及に貢献する。

具体的には、研究代表者がこれまでに取り組んできたキャビティ(空洞共振器)付きスロットアンテナを主に取り扱い、次に示すような点に焦点を絞って、理論・実験の両面から特性を明らかにして問題点を解決してゆく。

- (1) 給電線を含めた等価回路を構築し、簡略で計算時間の短い設計に役立てる。
- (2) アンテナを曲げた際の特性変化を明らかにする。
- (3) アンテナが水分を多く含む物体の近傍にある場合の特性を明らかにする。

## 3. 研究の方法

設計・試作・測定するアンテナとしてはキャビティ付きスロットアンテナを主に扱う。使用周波数帯としては主に2.4GHz帯を対象とし、RFIDの使用を意図するものについては920MHz帯も対象とする。

導電性織物として、伝統技法を用いた金属糸と絹糸を織った織物を使用する。但し、織り方等はアンテナの設計パラメータには入っていないので、同等の表面抵抗率をもった織物を用いれば同様のアンテナの設計・作製が可能になり、その意味では本研究の成果は織物材料には依らないものである。

水分を多く含む物体の近くに置くアンテナの提案においては、柔らかい構造であることに捉われず、まずは銅板を使用したアンテナについて基本特性と設計法を示してゆく。

アンテナを接続する無線機が通常の通信機、トランシーバである場合だけでなく、RFIDチップを直接、アンテナに乗せる構造のものについても、インピーダンス整合の関係からかなり設計法が変わると考えられるが、その可能性を調べる。

設計には主に有限要素法に基づく3次元電磁界シミュレータを用いるが、簡略な計算を目指すために、汎用の回路シミュレータも用いる。また、計測には標準的なネットワークアナライザ、スペクトルアナライザを用い、測定は電波暗室にて行う。

## 4. 研究成果

導電性織物を使った柔らかい構造のアンテナとして、キャビティ付きスロットアンテナを取り扱い、設計・作製・測定を行った。図1、図2に作製したアンテナの一つについて写真及びその構造の概略図を示す。

### (1) 給電部の等価回路

給電線路を含めた等価回路を構築し、簡略で計算時間の短い設計に役立てることを目的として、等価回路モデルに関する検討を行った。

導電性の織物は一般的にはんだ付けができない。電気回路としての接続は通常、導電性の接着剤が使用されたりする。しかし、特殊な接着剤である上、強度等に問題がある。

研究代表者はこれまで、スロット型のアンテナに対し電磁結合による非接触給電を採用し、接着剤を使わない接続について研究してきた。給電線路の形状ならびに給電位置については、アンテナと給電線のインピーダンス整合を考えて、設計段階で繰り返し計算が必要となる。従来、3次元電磁界解析のみによって計算していたが、本研究においては2013年に提案した簡易な等価回路モデルをさらに精度の高いものとするよう、特に非接触給電の電磁結合部に対する回路パラメータ抽出に主眼を置いて、簡易な回路シミュレータで扱うことのできるモデルを構築した。

まず、非接触給電を行っている給電線路（マイクロストリップ線路）とアンテナとの電磁結合を解析的に求めて、相互インダクタンスを導出し、インピーダンス整合のための同調線路部、および約半波長の長さをもつスロット部を含めた等価回路を導出した。その結果、等価回路の精度を上げることができた。但し、アンテナ部分を分布定数回路で表した場合の回路定数（位相定数、減衰定数）は測定結果からパラメータ抽出しており、これらを実験ではなく、理論計算により決定する方法を今後考える必要がある。

次に、給電線上の電流分布が一様でないことを考慮に入れた計算を行って相互インダクタンスを求め、一様電流分布の場合と比較を行った。結果として大きな差異は見られず、簡単な電流分布を仮定しても等価回路モデルは求められることがわかった。また、スロット部の等価回路において、放射分を線路の減衰定数で表すのではなく集中定数素子として表現する方法を試み、それによってさら



図1 給電マイクロストリップ線路を付けた導電性織物キャビティ付きスロットアンテナの写真。

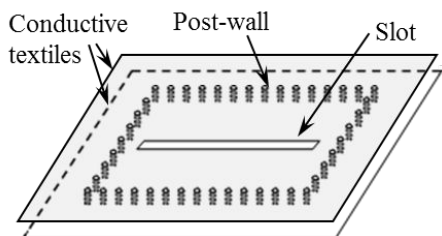


図2 ポスト壁による空洞共振器にスロットを開けた構造のキャビティ付きスロットアンテナ。

に等価回路による結果と3次元電磁界解析による結果とが近くなり、精度が上がった。

また、別の応用例として、給電部で整合を取る対象が通常の50のインピーダンスではなく、複素インピーダンスをもつ回路に対して整合を取る場合を提示し、シミュレーション計算と実験によりその有用性を示した。

以上の成果として、動作周波数や整合回路パラメータの決定に際し、等価回路による計算結果と3次元電磁界解析シミュレーションによる結果との差がこれまでよりも小さくなり、すなわち簡単な計算で同等の結果が得られるようになった。等価回路を得るために3次元電磁界解析は不可欠なのであるが、設計に必要な全体としての計算量は大幅に軽減することができ、計算時間短縮に大きな効果がある。

## (2) キャビティの変形

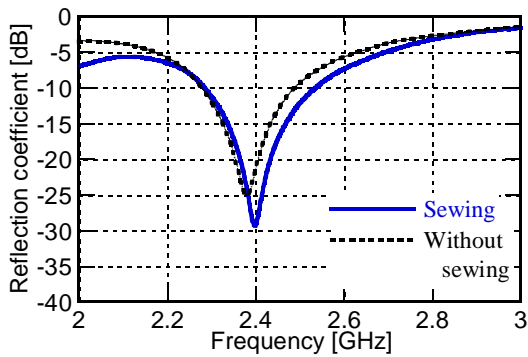
織物を使った回路の一番の特長は柔軟性である。RFID タグあるいは身体に装着する無線機器のアンテナの場合、アンテナ自体を曲げる必要が生じる場合がある。平坦な形状もしくは曲面状のアンテナは既に古くより開発されているが、平坦であったり曲げたり変形する場合のアンテナの特性変化については解明されていないので、本研究ではキャビティ付きスロットアンテナについて、曲げて使用する際の問題点を指摘するとともにその主要な原因をシミュレーション解析により推定した。

アンテナを曲げた際に、キャビティが球面に沿って単純に曲がる場合と変形を伴って曲がる場合とを比較した。変形はキャビティの中心部が厚くなること、ならびに底面に織物の伸縮が起きることをモデル化し、シミュレーション計算により特性の変化を示した。放射特性については測定結果におけるような放射パターンの変化を説明できなかったが、反射特性における周波数シフトについては、単純なモデルよりも新しく提案した変形モデルのほうが測定における変化を説明できるものであった。

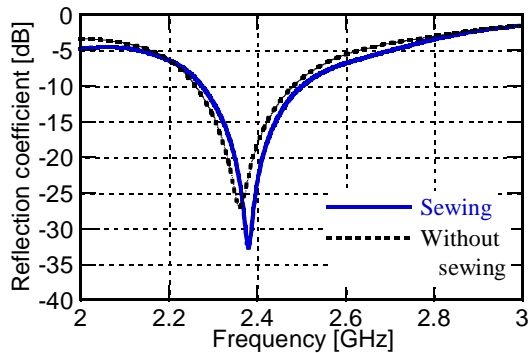
また、曲げた際の特性変化をシミュレーションにより計算できることは設計において重要であるが、実験においては曲げによって動作周波数が低くなるのに対し、単純な曲げのモデルによるシミュレーションでは高くなっていた。本研究で提案した変形を含む曲げのモデルにより、計算において定性的な一致を見た。

## (3) 織物基板をもつ給電線路の使用

先述のようにアンテナを曲げることにより、平坦な場合と比べて動作周波数が変化することがわかった。これは実際に使用する際には不都合である。その対策の一つとして、アンテナへの給電線路をより柔らかい素材で構成すること、すなわちアンテナ本体と同様に織物を使うことを考えた。給電のための



(a) 曲げの曲率半径が 225 mm の場合



(b) 曲げの曲率半径が 150 mm の場合

図 3 キャビティ付きスロットアンテナを曲げたときの反射特性の変化。給電マイクロストリップ線路をアンテナに縫い付けた場合と縫い付けずに貼り付けたテープで抑えた場合を示している。

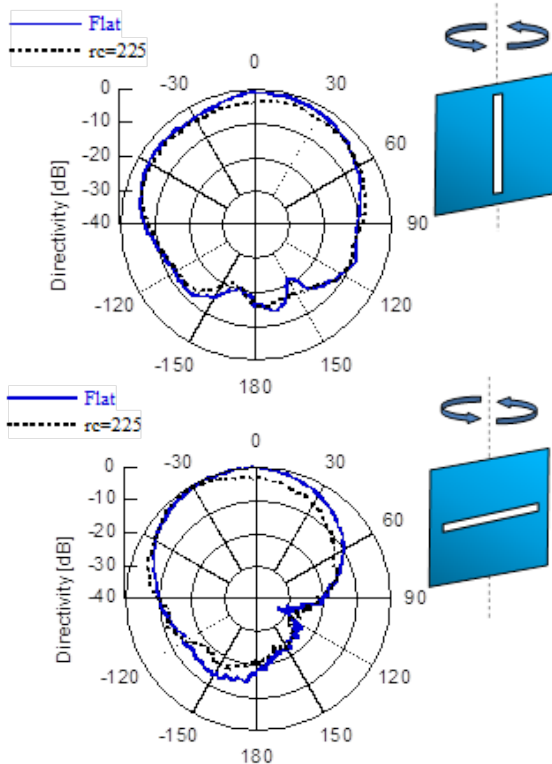


図 4 キャビティ付きスロットアンテナの放射特性。上は E 面パターン、下は H 面パターン。平面状の場合と曲げの曲率半径が 225 mm の場合を示している。

マイクロストリップ線路の基板としてポリエステル製の織物を使ったものを作製した。その結果、従来のフィルム状 PTFE を素材に用いる場合に比べて、平面状から球面状に沿って曲げた際の特性の変化が軽減され、また却って整合範囲の広いものが得られ、帯域においても改善することができた。この結果、柔らかいアンテナへの給電線路として適していることがわかった。

測定結果の一例として、図 3 に反射特性から見た動作帯域の変化を示し、図 4 に放射特性の曲げによる変化を示す。

#### (4) キャビティの小型化

解析によってアンテナの曲げによる動作周波数帯の変化は主にキャビティの変形によるものであることは推測できていた。どのようなメカニズムで影響を及ぼしているかは解明できなかったが、この曲げに対する影響、特に動作帯域の変化を小さくするため、キャビティをこれまでの直方体から円筒形に変え、その円筒形を半分に切った形のものを使うことで小型化を図った。その結果できた半円筒形キャビティ付きスロットアンテナは従来のものよりも曲げた際の動作周波数帯の遷移が小さく、また放射パターンも変形が小さくなった。図 5 に概略図を示す。

半円筒をさらに半分にした 1/4 円筒形のキャビティ付きスロットアンテナを試作して、特性測定を行った。これは導電性織物ではなく金属シートを使用して試作したものであり、スロット部が直角に曲がり V 字形になったものであるが、920MHz 帯において直線偏波を放射し、これまでと同様の放射パターンが得られることが確認できた。まだ曲げに対する特性は調査しておらず、今後、解析と測定を続ける必要がある。

また、曲げに対する影響を小さくするためにスロット線路をメアンダ状に変え、キャビティ上面における面積を小さくすることでキャビティ自体を小型化することを試みた。メアンダの形を調整すること、およびキャビティ高さを小さくすることで、アンテナのサイズを約 0.3 倍にまで小型化できた。

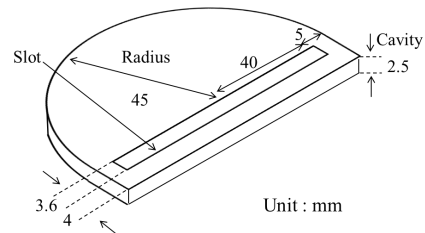


図 5 半円筒形キャビティ付きスロットアンテナの概略図。

#### (5) 近傍の物体

本研究におけるアンテナは物体(商品)、あるいは身体近傍に置いて使用するような応用場面を想定している。その場合、それらが障害物となってアンテナの特性が変化する。本研究では水分を多く含む人体や野菜、果実を念頭に置き、水を近傍に置いて影響の少ないアンテナを提案し、設計・試作・測定によりその特性を明らかにして実現可能性を示した。

提案したのは2重円筒状の磁界型アンテナで、まずは柔らかい構造であることに捉われず、試作アンテナとしては銅板を使い、920MHz帯のものを試作した。小型で、広くRFIDタグに使用されているダイポール型のアンテナと比べて近傍の水の影響が少ないことを数値計算及び実験により示すことができた。

なお、この磁気型のアンテナについては導電性織物を用いておらず、織物を用いた場合は変形などの影響を調べることが今後、必要となる。

以上、導電性の繊維を含んだ織物を使って、形状を変えられる柔らかい構造の高周波アンテナを設計・作製し、曲げた場合の特性を測定・解析した。そしてアンテナを曲げた場合の問題点を示し、その原因、解決策について検討した。また、身体あるいは物体の近傍に置いて使用しても特性の変化が少ないアンテナを提案した。これらの結果は、ウェアラブルアンテナの新たな一つの可能性を与えるものであり、これまでに使われているウェアラブル機器がさらに広く使用されるようになるために有用なものと考えている。

#### 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6件)

Y. Ishii, H. Shimasaki, "Effect of vegetation on radio wave propagation in 920-MHz and 2.4-GHz bands," Proceedings of International Symposium on Antennas and Propagation 2016, 査読有, pp. 354-355, Oct. 2016.

K. Fujiwara, H. Shimasaki, K. Morimoto, "Studies on a fabric feed line sewn to a flexible slot antenna," Proceedings of 2016 International Workshop on Antenna Technology, 査読有, pp. 11-14, Feb. 2016, DOI: 10.1109/IWAT.2016.7434786.

J. Uno, H. Shimasaki, "Design and evaluation of a cylindrical antenna for RFID in the 900-MHz band," Proceedings of 2015 IEEE Conference on Antenna Measurements and Applications, 査読有, pp.1-3, Nov. 2015, DOI: 10.1109/CAMA.2015.7428158.

S. Kimura, K. Fujiwara, H. Shimasaki,

"Frequency shift of a cavity-backed slot antenna bent along a spherical surface," Proceedings of 2015 Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation, 査読有, pp.123-125, July 2015, DOI: 10.1109/APCAP.2015.7374297.

K. Yoshimatsu, K. Sato, T. Kubo, H. Shimasaki, "Equivalent circuit of the excitation to a slot antenna and the matching to a complex impedance," Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference 2014, 査読有, pp.965-967, Nov. 2014.

K. Fujiwara, H. Shimasaki, K. Morimoto, N. Kuwahara, "Studies on a polyester fabric substrate of the feed line to a flexible slot antenna," Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference 2014, 査読有, pp.456-458, Nov. 2014.

##### [学会発表](計8件)

石井佑宇人, 島崎仁司, "導電性織物を用いた半円筒形キャビティ付きスロットアンテナを曲げた際のアンテナの特性," 平成28年電気関係学会関西連合大会, 2016年11月22日, 大阪府・堺市.

木村心哉, 石井佑宇人, 島崎仁司, "導電性織物を用いたキャビティ付きメアングスロットアンテナの特性測定," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2016年9月22日, 北海道・札幌市.

石井佑宇人, 島崎仁司, "導電性織物を使った半円筒形キャビティ付きスロットアンテナの反射・放射特性," 電子情報通信学会マイクロ波研究会, 2016年5月20日, 京都府・京都市.

宇野純平, 島崎仁司, "900MHz帯RFID円筒形アンテナの設計及び評価," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2015年9月11日, 宮城県・仙台市.

木村心哉, 藤原一浩, 島崎仁司, "キャビティ付きスロットアンテナを曲げた際の空洞部変形の影響," 電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会, 2015年5月22日, 奈良県・橿原市.

木村心哉, 藤原一浩, 島崎仁司, "柔らかいキャビティ付きスロットアンテナにおける空洞部の変形について," 電子情報通信学会総合大会, 2015年3月10日, 滋賀県・草津市.

吉松和宏, 佐藤建太, 久保天外, 島崎仁司, "スロットアンテナ給電部の等価回路と複素インピーダンスを持つ素子との整合," 電子情報通信学会マイクロ波研究会, 2014年12月18日, 東京都・渋谷区.

藤原一浩, 島崎仁司, 森本一成, 桑原教彰, "織物で構成した給電線路を用いたキャビティ付きスロットアンテナの検討," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2014年9月23日, 徳島県・徳島市.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

島崎 仁司 ( Hitoshi Shimasaki )  
京都工芸繊維大学・電気電子工学系・准教授

研究者番号：20226202

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし