

リストバンド型 RFID 用アンテナの特性解析

中島 崇志[†]齊藤 一幸^{††}高橋 応明^{††}伊藤 公一[†]

Evaluation on Characteristics of Wristband Type RFID Antenna

Takashi NAKAJIMA[†], Kazuyuki SAITO^{††}, Masaharu TAKAHASHI^{††}, and Koichi ITO[†]

あらまし 近年, RFID (Radio Frequency Identification) システムは, 個人認証や物流管理などに利用されるなど, 普及が進んでいる. 読取り対象となる RFID タグには様々な形状のものが存在し, 用途に適したものが選択される. その一例として, リストバンド型のタグを用いた個人認証が挙げられる. しかしながら, リストバンド型のように人体に装着して RFID タグを用いる場合には, 人体の誘電性によりアンテナ特性が変化する. そこで本論文では, リストバンド型 RFID 用アンテナの特性解析を数値解析及び生体等価ファントムを用いた実験によって行い, 人体がアンテナ諸特性に与える影響を評価した. 更に, アンテナに反射素子を装荷することによる利得改善の検討を行った. 以上の結果より, 人体がアンテナ諸特性に影響を与えることを確認し, また, 反射素子の装荷により放射特性の改善が可能であることを示した.

キーワード RFID, リストバンド, 生体等価固体ファントム, 反射素子, 放射指向性

1. ま え が き

近年, RFID (Radio Frequency Identification) システムの急速な普及には目覚ましいものがある. 現在, 主に個人認証, 物体認識, 商品管理, セキュリティ管理などに利用されており, その利用分野は今後ますます広がっていくことが考えられる [1]. RFID とは, IC チップが搭載された RFID タグとリーダの間で情報のやり取りを行う無線通信技術である. 通信を行うアンテナの性能によって通信エリアが決定されてしまう. 更に, アンテナの形状や大きさによって, アンテナを搭載するタグの大きさも決定される. そのため, RFID システム内においてアンテナの役割は重要である. また, 用途によって必要な通信距離が異なり, 電子マネーや個人認証などセキュリティ面を考慮しなければならないものは数 cm 程度, 一度に多数のタグを認証する物流管理では数 m の通信距離が必要である. したがって, 使用する周波数帯も様々である [2]. そのため, 使用状況や使用周波数帯ごとに多様なアンテナ

が提案されている [3], [4].

ところで, RFID タグにはカード型, ラベル型, キーホルダー型のものなど様々な形状のものが存在し, それぞれ用途に適したものが選択される. その一例として, リストバンド型タグを用いた個人認証が挙げられる. リストバンド型タグは, 腕に装着することで, その存在をほとんど意識せずに利用できる点で有用である. このリストバンド型タグを用いた医療応用も考えられている [5]. 患者がリストバンド型のタグを装着することで, 医療機関側がそのタグの ID を読み取り, 電子カルテを照会することにより, その患者の情報を得ることができる. しかしながら, 誘電率や導電率の高い人体の近傍で RFID タグを用いる場合には, タグ内のアンテナの入力特性や放射特性が影響を受ける [6] ~ [8]. リストバンド型タグの場合もアンテナと人体の距離は近接するため, その影響を無視することはできない. このような環境下で使用するタグのアンテナを設計する場合には, 人体の影響を考慮する必要がある. これまで, 人体近傍におけるアンテナの諸特性評価に関する研究 [9], [10] は行われているものの, アンテナをリストバンドに埋め込み, 腕部に装着した場合のアンテナ諸特性評価はほとんどなされていない.

本論文では, RFID 用としての利用を想定したアンテナを, リストバンドに埋め込んで使用した場合の諸

[†] 千葉大学大学院工学研究科, 千葉市

Graduate School of Engineering, Chiba University, Chiba-shi, 263-8522 Japan

^{††} 千葉大学フロンティアメディカル工学研究開発センター, 千葉市

Research Center for Frontier Medical Engineering, Chiba University, Chiba-shi, 263-8522 Japan

特性を数値解析及び生体等価ファントムを用いた実験により検討し、腕部がアンテナ諸特性に与える影響を評価した。動作周波数は、ISM (Industrial Scientific and Medical) バンドの一つであり、アンテナの小形化が容易な 2.4 GHz 帯とした。

2. では、検討したリストバンド型 RFID 用アンテナの構造及び測定に用いたモデルについて説明し、アンテナをリストバンドに埋め込んだ場合の入力インピーダンス、放射指向性の数値解析結果と測定結果を示す。3. では、リストバンドを生体等価ファントムで構成した腕部モデルに装着して解析を行い、人体腕部の有無によるアンテナ諸特性の比較を行う。更に、リストバンドと腕部の距離を変化させた際の検討を行う。4. では反射素子の装荷による利得の改善を提案する。最後に、5. で結論を述べる。

2. リストバンド型 RFID 用アンテナ

2.1 アンテナに求められる特性

リストバンド型 RFID タグ用アンテナに求められる条件は、アンテナがリストバンドに内蔵できることと、通信を行うのに十分な腕部装着時の放射特性である。通信可能距離 r は、リーダへの供給電力を P_t 、リーダのアンテナ利得を G_t 、IC チップの消費電力を P_r 、タグのアンテナ利得を G_r とすると、式 (1) のフリスの伝達公式より容易に類推可能である。

$$r = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_t G_t G_r}{P_r}} \quad (1)$$

ただし、 λ は波長を表す。この式を用いて、医療機関における入院患者の情報管理としての使用を想定して、リストバンド型 RFID タグ用アンテナに必要な利得の概算を行った。表 1 に本研究におけるリストバンド型 RFID の設計値を示す。送受信間距離はハンディタイプのリーダとベッドに寝ている患者間を想定し、30 cm とした。また、リーダの利得は 2.15 dBi、供給電力を 100 mW と仮定し、IC チップへ送電される電力は、タグを駆動させるのに必要な電力である $30 \mu\text{W}$ とした。

以上より、リストバンド型 RFID タグ用アンテナに必要な利得は -7.6 dBi 以上である。

2.2 アンテナ構造

RFID 用アンテナをリストバンドに埋め込むために、アンテナはリストバンドに収まる大きさに制限する必要がある。したがって、アンテナの形状は小形かつ

表 1 リストバンド型 RFID の設計値
Table 1 Designed values of wristband type RFID.

Frequency f	2.45 GHz
Distance r	30 cm
R/W antenna gain G_t	2.15 dBi
R/W supply capability P_t	100 mW
IC dissipation power P_r	$30 \mu\text{W}$

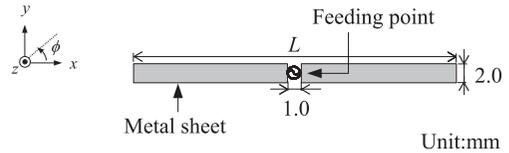


図 1 アンテナの構造
Fig. 1 Structure of the antenna.

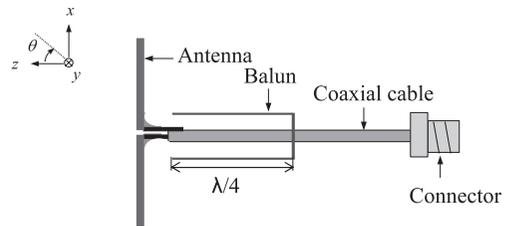


図 2 測定モデル
Fig. 2 Measured model.

薄型でなければならぬ。また、着脱の際などにリストバンドの形状が大きく変形するため、フレキシブルな構造であることも必要である。そこで本研究では、図 1 に示すアンテナを用いて検討を行った。本アンテナは、長さ L (変数)、幅 2.0 mm のシート状のダイポールアンテナである。アンテナ素子は、数値解析の際には厚みを考慮しない完全電気導体、実験の際には厚さ 0.1 mm の銅板で作製した。アンテナの長さ L は、動作周波数が 2.45 GHz となるように調整した。また、素子間に 1 mm のギャップがあり、このギャップを給電点とした。数値解析には、有限要素法をもとに計算を行う Ansoft 社の HFSS Ver. 10 を用いた。

図 2 に、測定に用いたアンテナのモデルを示す。RFID タグを実際に使用する場合には、アンテナの給電点には IC チップを搭載する。しかしながら、入力インピーダンスや放射特性を測定する場合には測定機器を接続する必要がある。そこで本研究では、図 2 のように同軸ケーブルをアンテナに接続し、測定を行った。また、同軸ケーブルの周りには、外導体へ電流が流れることを防ぐために、長さが $1/4$ 波長のバズーカ型のバランを装荷した。

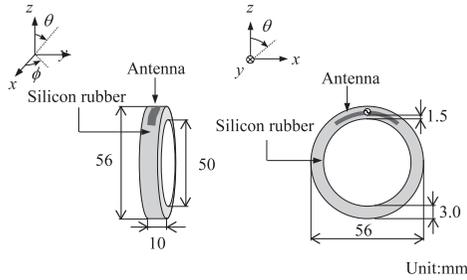


図3 アンテナを埋め込んだリストバンドの構造
Fig. 3 Structure of the wristband with antenna.

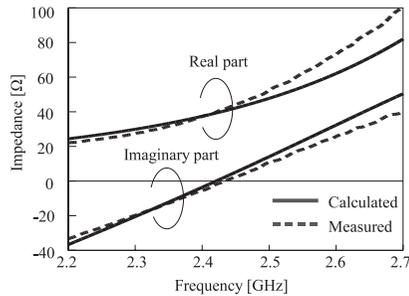


図4 リストバンドに埋め込んだ場合のアンテナ入力インピーダンス
Fig. 4 Input impedance of the antenna embedded into the wristband.

2.3 リストバンドモデル

本研究で用いたリストバンドのモデルを図3に示す。リストバンドの材質はシリコンゴムとし、腕に装着することを想定して円筒型とした。シリコンゴムの電気定数は、比誘電率3.0、誘電正接 1.4×10^{-2} とした。電気定数の周波数特性は考慮にいないものの、2~3 GHzにおいて変動はほとんどないため、2.45 GHzにおける値を用いている。腕部モデルの大きさは直径50 mmと想定したため、リストバンドの大きさは、腕の大きさに合わせて内径を50 mmとした。幅は10 mm、厚さは3 mmとし、深さが1.5 mmの位置にアンテナを埋め込んだ。その際には、アンテナを誘電体に埋め込んだことで電磁波の波長短縮が生じるため、アンテナの長さ L は2.45 GHzにおいて整合が取れるように調整を行い、42 mmとした。

2.4 リストバンドに埋め込んだアンテナ諸特性

まず、アンテナをリストバンドに埋め込んだ場合のアンテナ諸特性について数値解析と実測の両面から検討を行った。

図4に、リストバンドに埋め込んだ場合のアンテナ入力インピーダンスの結果を示す。実際には、アン

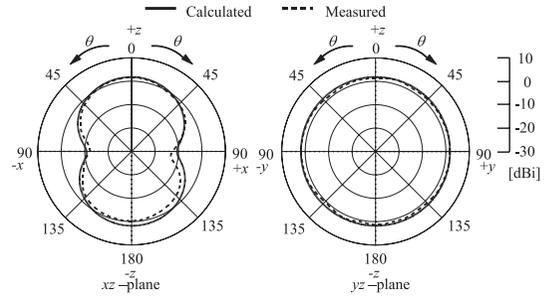


図5 リストバンドに埋め込んだ場合の放射指向性
Fig. 5 Radiation patterns of the antenna embedded into the wristband.

テナ入力インピーダンスは使用するICチップの出力インピーダンスと整合を取る必要がある。しかしながら、本研究ではアンテナ諸特性の測定を行う都合により、ICチップを搭載していないため、50 Ωでインピーダンス整合をさせた。本アンテナはダイポールアンテナであるので、実際にICチップを搭載する場合も、アンテナの長さを変えることや引出し配線を設けることにより容易にインピーダンス整合をとることができる[11]。図4より、インピーダンスの実部、虚部ともに数値計算結果と実測の傾向がおおむね一致していることが分かる。RFIDタグの動作周波数である2.45 GHzにおけるアンテナ入力インピーダンスは計算値が $42.2 + j5.1 \Omega$ 、測定値が $43.8 + j2.0 \Omega$ であった。これは、 S_{11} に換算すると計算値が-19.9 dB、測定値が-23.7 dBであり、整合がとれているといえる。

図5に、リストバンドに埋め込んだ場合の2.45 GHzにおける放射指向性の結果を示す。自由空間中におけるダイポールアンテナの放射指向性に比べて、 x 軸方向におけるヌルが浅く、利得が得られていることが分かる。これは、アンテナがリストバンド内部において湾曲していることが原因であると考えられる。これ以外は、自由空間中における結果とほぼ同様な放射パターンである。以上より、シリコンゴム内を伝搬する電磁波は波長短縮が起きているものの、シリコンゴムがアンテナの放射指向性に与える影響は大きくないことが分かる。アンテナの最大利得は、計算値で1.76 dBi、測定値で1.65 dBiであった。また、放射効率は計算値で95%であり、これからも、シリコンゴムによるアンテナ放射特性への影響はほとんどないことが分かる。

3. 腕部に装着したアンテナ諸特性

本章では、前節のアンテナを埋め込んだリストバン

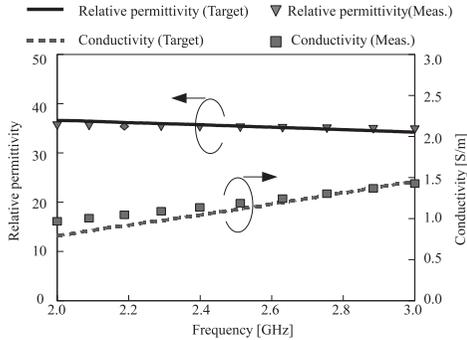


図 6 2/3 筋肉等価ファントムの電気定数
Fig. 6 Electrical properties of the 2/3 muscle equivalent phantom.

ドを腕部に装着した場合のアンテナ諸特性の解析を行い、腕部の有無によるアンテナ諸特性の比較を行う。更に、腕部とリストバンドの距離（すき間）を変化させた場合の検討を行う。

3.1 検討モデル

本研究では、人体の筋肉組織の平均的な電気定数 [12] に 2/3 を乗じた値を目標値として生体等価固体ファントムを作製し、腕部モデルとして用いた [13]。ファントムの形状は日本人の平均的な体型における人体腕部を想定し、直径 50 mm、長さ 450 mm の円柱型とした [14]。図 6 に、作製した 2/3 筋肉等価ファントムの電気定数の測定結果を示す。ファントムの電気定数の測定にはアジレントテクノロジー社製の HP85070E 誘電率プローブキットを用いた。これは、開放終端同軸プローブを材料に押し当て、ネットワークアナライザによる反射係数測定の結果により電気定数を導出している。本アンテナの動作周波数である 2.45 GHz における電気定数の目標値は比誘電率 35.2、導電率 1.16 S/m である。一方、作製したファントムの電気定数は比誘電率 35.6、導電率 1.08 S/m であった。これは目標値との誤差が 10% 以内であり、アンテナの特性評価には十分に利用可能である [15]。

アンテナを埋め込んだリストバンドを人体腕部に装着したモデルを図 7 に示す。リストバンドは腕部と密着させ、腕部モデルの先端から 200 mm の位置に配置した。アンテナの長さは入力インピーダンスを調整するために $L = 30$ mm とした。図 8 に、リストバンドを腕部モデルに装着した場合のアンテナへの給電方法を示す。給電用の同軸ケーブルが放射特性に与える影響を小さくするためにファントムの内部に同軸ケー

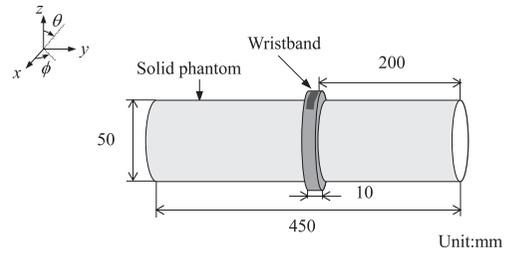


図 7 リストバンドを人体腕部に装着したモデル
Fig. 7 Structure of the human arm model wearing the wristband.

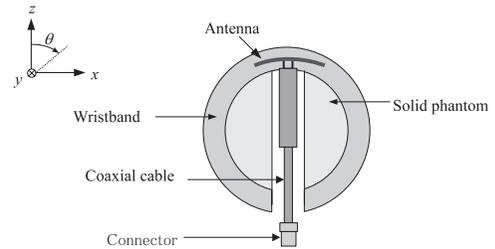


図 8 腕部にリストバンドを装着した場合のアンテナへの給電方法

Fig. 8 Feeding scheme for the antenna embedded into the wristband with arm.

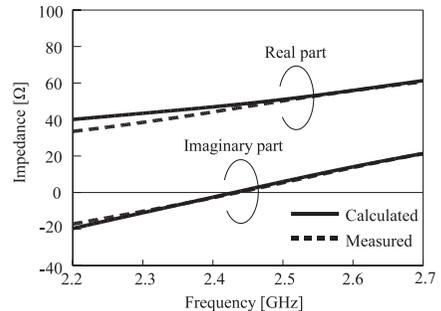


図 9 腕部に装着した場合のアンテナ入力インピーダンス
Fig. 9 Input impedance of the antenna embedded into the wristband with arm.

ブルを通した。アンテナを配置するファントムの先端から 200 mm の位置に直径 10 mm の円筒型の孔を設け、その中に同軸ケーブルを通してアンテナへの給電を行った。

3.2 アンテナ諸特性

図 9 に、アンテナを埋め込んだリストバンドを腕部に装着して使用した場合のアンテナ入力インピーダンスの結果を示す。インピーダンスの実部、虚部ともに数値計算結果と実測結果が良好に一致していることが分かる。2.45 GHz における入力インピーダンスの値は、

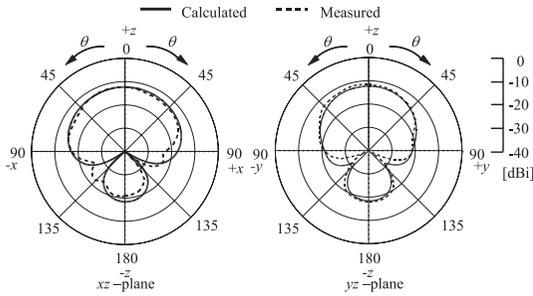


図 10 腕部に装着した場合の放射指向性

Fig. 10 Radiation patterns of the antenna embedded into the wristband with arm.

計算値が $42.2 + j5.1 \Omega$ ，測定値が $43.8 + j2.0 \Omega$ であった．これは， S_{11} に換算すると計算値が -33.7 dB，測定値が -30.3 dB であり，整合がとれているといえる．

図 10 に，アンテナを埋め込んだリストバンドを腕部に装着して使用した場合の 2.45 GHz における放射指向性の結果を示す．図 5 の腕部のない場合の結果と比べて利得が低下していることが分かる．特に腕部が存在する $-z$ 方向では，利得が大きく低下している．これは，損失媒質であるファントムによって電磁波が吸収されているためであると考えられる． $+z$ 方向への放射が大きく，最大利得は計算値で -12.3 dBi，測定値で -11.9 dBi であり，リストバンドのみの場合と比較して約 14 dB 程低下している．また，設計値と比較すると，約 4.5 dB 低くなっているため想定したアプリケーションとしての使用は困難である．また，放射効率は数値計算において 1.8% となった．アンテナは完全電気導体でモデル化しているため，アンテナ自体には損失が発生しない．したがって，アンテナから放射された電力のほとんどは腕が吸収していると考えられる．

3.3 腕部とリストバンドの距離に関する検討

前節までは，腕部とリストバンドを密着させた状態で検討を行った．しかしながら，実際にリストバンドを装着する際には，リストバンドと腕部が常に密着しているわけではなく，すき間が生じることが考えられる．そこで，腕部とリストバンドの距離を変えたモデルの解析を行い，アンテナ諸特性の変化について評価を行った．図 11 に示すように，腕部とリストバンドの距離 d を 0~3 mm の間で 1 mm ごとに変化させ，アンテナ諸特性を数値解析により算出した．アンテナはリストバンドの表面から 1.5 mm の位置に埋め込まれているため， d を変化させることでアンテナ素子と腕

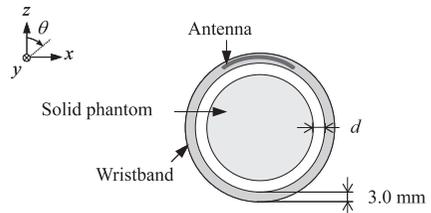


図 11 腕部とリストバンドの距離

Fig. 11 Distance between arm and wristband.

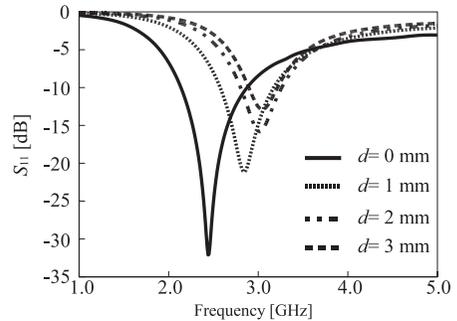


図 12 腕部とリストバンドの距離を変えた場合の反射係数

Fig. 12 Reflection coefficient of changed distance between arm and wristband.

部の距離は 1.5~4.5 mm の間で変化する．腕部モデルの大きさは直径 50 mm で固定し，リストバンドの内径及び外径を変化させた．アンテナの長さ L は，腕部モデルとリストバンドが密着した状態で整合のとれる 30 mm として検討を行った．

図 12 に，腕部とリストバンドの距離を変化させた場合の反射係数の結果を示す．腕部とリストバンドの距離が広がるにつれて共振周波数が高くなることが分かる．これは，アンテナが腕部と近接するほど腕部の影響を受けるためであると考えられる．距離 d が 0 mm のときと 3 mm のときでは，共振周波数に 600 MHz の差異が見られた．これより，腕部とアンテナ素子の距離が変化すると共振周波数が大きくずれてしまい，所望の周波数において通信が不可能になってしまうおそれがあることが分かる．そのため，リストバンド型 RFID 用としてこのアンテナを用いることは難しいと考えられる．

図 13 に，腕部とリストバンドの距離を変化させた場合の 2.45 GHz における放射指向性の結果を示す．なお，ここではインピーダンスの不整合損失は考慮せず，アンテナの長さが 30 mm のときの放射指向性を比較している．アンテナの最大利得は， $d = 0, 1, 2, 3$ mm

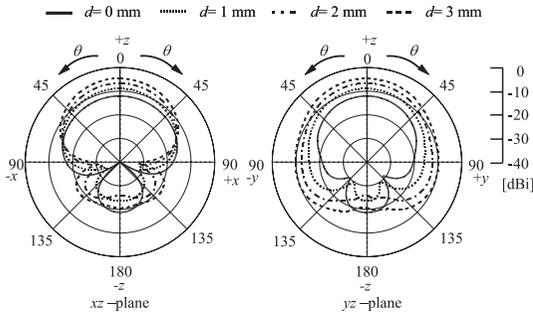


図 13 腕部とリストバンドの距離を変えた場合の放射指向性
Fig. 13 Radiation patterns of changed distance between arm and wristband.

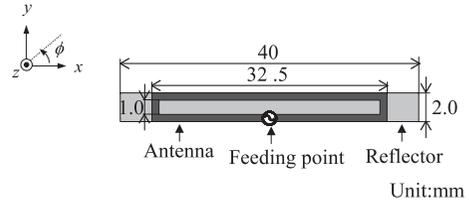
のときがそれぞれ, -12.3 dBi, -8.9 dBi, -6.6 dBi, -4.5 dBi であり, 距離が広がるにつれて利得が高くなるのが分かる. これは, 腕部とアンテナの距離が近いほど腕部の電磁波吸収分が増加することが原因であると考えられる.

以上より, 腕部とリストバンドの距離が変わることによってアンテナ諸特性が変化することが分かる.

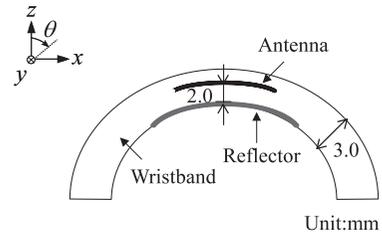
4. 反射素子の装荷による利得の改善

4.1 検討モデル

前章までの結果より, リストバンドに埋め込んだアンテナの放射特性は腕部モデルに装着したことによって利得が大きく低下することを確認した. また, 腕方向へも電磁波が放射されているために, 人体での電磁波の吸収も大きくなり, 放射効率が非常に低い値であった. そこで, アンテナと人体の間に反射素子を装荷し, 人体方向への放射の低減及びアンテナの利得の改善を試みた. 図 14 にアンテナの構造と反射素子との位置関係を示す. 反射素子は, 数値解析の際には厚みを考慮しない完全電気導体, 実験の際には厚さ 0.1 mm の銅板を用いた. 反射素子とアンテナの距離は非常に近くなるため, ダイポールアンテナではインピーダンス実部が低くなってしまい, 整合がとりにくくなる. そこで, アンテナはシート型の折返しダイポールアンテナとした. アンテナの幅は前述のアンテナと同様に 2 mm とし, 長さは 2.45 GHz で整合がとれるように 32.5 mm とした. 反射素子は腕部とリストバンドの境界に配置し, 大きさは, 幅 2 mm, 長さ 40 mm とした. また, アンテナは反射素子から 2 mm の位置に埋め込んだ.



(a) Structure of the antenna



(b) Embedded position

図 14 反射素子を装荷したモデル
Fig. 14 Structure of the antenna with reflector.

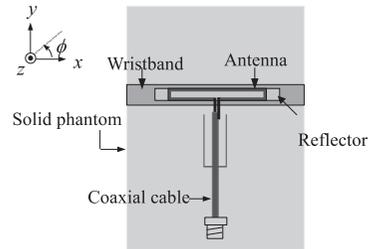


図 15 反射素子を装荷した場合のアンテナへの給電方法
Fig. 15 Feeding method for the antenna in load of reflector.

図 15 に反射素子を装荷した際のアンテナへの給電方法を示す. 反射素子はリストバンドと腕部の境界に配置したため, 図 8 のように $-z$ 方向から同軸ケーブルで給電することはできない. そのため, 図 15 のように y 方向に同軸ケーブルをつなぎ, 給電を行った.

4.2 反射素子を装荷した際のアンテナ諸特性

図 16 に, 反射素子を装荷した場合のアンテナ入力インピーダンスの結果を示す. インピーダンスの実部, 虚部ともに数値計算結果と測定結果の傾向がおおむね一致していることが分かる. 2.45 GHz における入力インピーダンスの値は, 計算値が $38.1 - j 2.0 \Omega$, 測定値が $32.0 - j 6.0 \Omega$ であった. これは, S_{11} に換算すると計算値が -16.4 dB, 測定値が -13.8 dB であり, 整合がとれているといえる.

図 17 に, 反射素子を装荷した場合の 2.45 GHz に

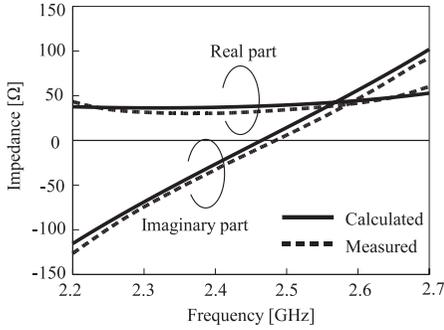


図 16 反射素子を装荷した場合のアンテナ入力インピーダンス
Fig. 16 Input impedance of the antenna with reflector embedded into the wristband.

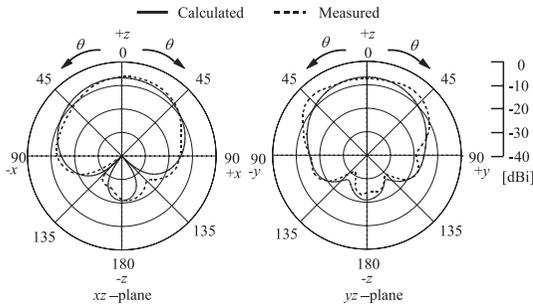


図 17 反射素子を装荷した場合の放射指向性
Fig. 17 Radiation patterns of the antenna with reflector embedded into the wristband.

おける放射指向性の結果を示す．図 10 に示した反射素子を装荷していない場合と比較して指向性の形はあまり変化していない．しかしながら，アンテナの最大利得は計算値で -6.7 dBi，測定値で -6.9 dBi であり，反射素子を装荷していないモデルの結果と比較すると 5 dB 程利得が改善している．設計値と照らし合わせても， 1 dB ほど高くなっているため，想定したアプリケーションに利用可能である．また，放射効率は数値計算において 5.1% であり，改善が見られた．これは，反射素子を装荷することにより，腕部の電磁波吸収量が減少したためであると考えられる．以上より，反射素子を装荷することによるアンテナ利得改善の可能性を示した．

図 18 に，反射素子を装荷した際の，腕部とリストバンドの距離を変化させた場合の反射係数の結果を示す．3.3 と同様に，図 11 に示すように腕部とリストバンドの距離 d を $0 \sim 3$ mm の間で 1 mm ごとに変化させ，アンテナ諸特性を数値解析により算出した．ア

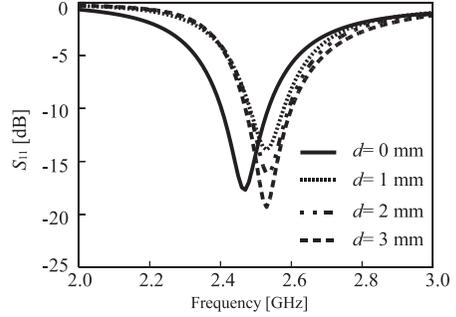


図 18 反射素子装荷時の腕部とリストバンドの距離を変えた場合の反射係数
Fig. 18 Reflection coefficient of changed distance between arm and wristband in case of loading a reflector.

ンテナ素子と腕部の距離は $2 \sim 5$ mm の間で変化する．図 18 より，腕部とリストバンドの間にすき間ができることによって，共振周波数が若干高くなっていることが分かる．しかしながら，図 12 の反射素子を装荷していない場合の反射係数の結果と比較すると，共振周波数のずれが小さくなっている．これにより，反射素子を装荷することは，腕部とアンテナの距離に対する共振周波数の変化量を軽減できるという点でも有効であるといえる．

5. む す び

本論文では，RFID 用アンテナをリストバンドへ埋め込み，人体腕部へ装着した場合の特性解析を行い，人体がアンテナに与える影響の評価を行った．その結果より，腕部に装着した場合には，腕部がない場合と比較して，最大利得が 14 dB 程度低下することを確認した．また，腕部とリストバンドの距離を変えた場合の検討を行い，距離が近いほど人体の影響が大きくなることを確認した．更に，反射素子を用いた放射特性の改善を提案し，反射素子を装荷していない場合と比較して最大利得を 5 dB 程度改善できることを示した．また，反射素子を装荷することによって，想定したアプリケーションでの使用が可能であることを示した．

本論文では，人体腕部を均質媒質で模擬して検討を行った．今後は，より現実に即した検討を行うために，層構造モデルやリアルな構造をもつ人体モデルを用いて検討を行う必要がある．

文 献

[1] K. Finkenzeller, RFID ハンドブック，日刊工業新聞社，2001.

- [2] 日本電気(株), 無線 IC タグの基本と仕組み, 秀和システム, 2005.
- [3] 上坂晃一, 非接触 IC カード/RFID 用アンテナの設計技術, トリケップス, 2004.
- [4] P.V. Nikitin, S. Lam, and K.V.S. Rao, "Low loss silver ink RFID tag antennas," 2005 IEEE APS International Symposium, vol.2B, pp.353-356, July 2005.
- [5] Sheng-Rong Huang, Gwo-jiun Horng, and Gwo-jia Jong, "Intelligent hospital space platform combined with RFID and wireless sensor," 2008 IHH-MSP International Conference, pp.1001-1004, Aug. 2008.
- [6] 越智大輔, 高橋応明, 齊藤一幸, 伊藤公一, 大前 彩, 上坂晃一, "生体等価固体ファントムを用いたリストバンド型 RFID アンテナの特性解析," 信学技報, A-P2006-142, March 2007.
- [7] 小川晃一, 小柳芳雄, 伊藤公一, "人体腹部に近接した 150 MHz 帯ノーマルモードヘリカルアンテナの実効放射効率の解析と効率に関する検討," 信学論(B), vol.J84-B, no.5, pp.902-911, May 2001.
- [8] 齊藤 裕, 西木戸友昭, 春木宏志, "2 GHz 帯腕時計型携帯無線端末用アンテナの放射特性," 信学論(B), vol.J82-B, no.10, pp.1937-1941, Oct. 1999.
- [9] R.Y.-S. Tay, Q. Balzano, and N. Kuster, "Dipole configurations with strongly improved radiation efficiency for hand-held transceivers," IEEE Trans. Antennas Propag., vol.46, no.6, pp.798-806, June 1998.
- [10] G. Marrocco, "RFID antennas for the UHF remote monitoring of human subjects," IEEE Trans. Antennas Propag., vol.55, no.6, pp.1862-1869, June 2007.
- [11] 上坂晃一, 高橋応明, "無線 IC タグにおけるアンテナ技術," 信学論(B), vol.J89-B, no.9, pp.1548-1557, Sept. 2006.
- [12] S. Gabriel, R.W. Lau, and C. Gabriel, "The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz," Phys. Med. Biol., vol.41, pp.2251-2269, April 1996.
- [13] 木南克規, 和田寛規, 平田晃正, 塩沢俊之, "UHF 波帯移動体端末用アンテナ設計のための人体のモデリングに関する検討," 信学論(B), vol.J85-B, no.11, pp.1991-1994, Nov. 2002.
- [14] 工学技術院生命工学技術研究所, "設計のための人体寸法データ集," 生命工学工学技術研究所研究報告, vol.2, no.1, 1994.
- [15] 滝本拓也, 大西輝夫, 齊藤一幸, 高橋応明, 伊藤公一, "UWB 通信帯域における生体等価ファントムの特性," 信学論(B), vol.J88-B, no.9, pp.1674-1681, Sept. 2005.
(平成 21 年 5 月 26 日受付, 9 月 10 日再受付)



中島 崇志 (学生員)

平 21 千葉大・工・メディカルシステム卒。現在千葉大大学院博士前期課程在学中。RFID 用アンテナに関する研究に従事。



齊藤 一幸 (正員)

平 13 千葉大大学院・博士後期課程了。博士(工学)。現在、千葉大・フロンティアメディカル工学研究開発センター・助教。マイクロ波の医療応用及び人体と電磁波との相互作用評価に関する研究に従事。平 12 IEEE AP-S Japan Chapter Young Engineer Award, 平 16 本会学術奨励賞等受賞。平 12 日本学術振興会特別研究員。IEEE, 映像情報メディア学会, 日本ハイパーサーミア学会各会員。



高橋 応明 (正員)

平元東北大・工・電気卒。平 6 東工大・大学院博士課程了。同年武蔵工大・工・電気・助手。同大講師を経て, 平 12 東京農工大・工・電気電子・助教授。平 16 千葉大・フロンティアメディカル工学研究開発センター・准教授。衛星放送受信アンテナ, 平面アンテナ, 小形アンテナ, RLSA, 環境電磁工学, 人体と電磁波との相互作用の研究に従事。工博。IEEE シニア会員。



伊藤 公一 (正員:フェロー)

昭 49 千葉大・工・電子卒。昭 51 同大大学院修士課程了。同年東工大・工・助手。昭 54 千葉大・工・助手, 平元同助教授, 平 9 同教授, 平 15 同大フロンティアメディカル工学研究開発センター教授, 平 18 同大・工・教授, 平 19 同大・院・教授となり, 現在に至る。平 21 より同大フロンティアメディカル工学研究開発センター長併任。主として, がん治療用マイクロ波アンテナ等の医療応用, 移動通信用小形アンテナ, 人体通信, ファントムを用いた人体と電磁波との相互影響評価の研究に従事。工博。著書「Handbook of Microstrip Antennas」(UK, 共著), 「Antennas and Propagation for Body-Centric Wireless Communications」(Artech House, 共著)など。現在, IEEE AP-S 論文誌編集委員, Distinguished Lecturer 及び AdCom 委員。IEEE Fellow, AAAS, 映像情報メディア学会, 日本ハイパーサーミア学会, 日本シミュレーション学会各会員。