

# 人体を誘電体として用いたアンテナの電気的特性評価

2013SE063 岩田暢央 2013SE115 三林和史 2013SE144 西口喬

指導教員：藤井勝之

## 1 はじめに

近年無線通信の発達によって人々は様々な場所で通信することが可能になった。無線通信にはアンテナが必要であり、アンテナを設置するには周囲に迷惑にならないように配慮する必要がある。そこで本研究では人体をアンテナの導電体として用いた受信アンテナを作製し、その有用性を示すことを目指した。

まずループアンテナを作製するための型を作製し、導線を型に巻きつけてループアンテナを作製した。作製したアンテナのSWRをアンテナアナライザ(AA-230ZOOM)[1]を用いて測定した。その際SWRは1.5を切る結果を示したためアンテナとして利用できると判断した。また電磁界解析ソフトであるXFDTD[2]を用いてSパラメータを求めた。続いて実際にアンテナを無線機に接続し通信を行い、受信電力、伝送距離を計測した。無線機の変調方式がLSBであるため、送信にはモールス符号の長点を用いて送信電力を安定させた。フリスの伝達公式とレイトレース法[3]を用いてシミュレーションを行い実測と比較した。

本研究の運用図を図1に示す。

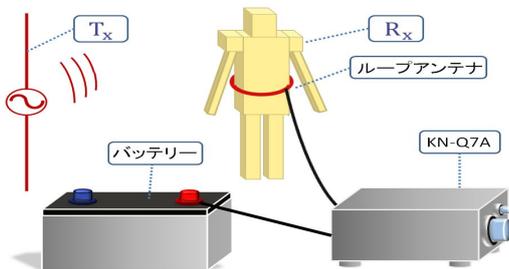


図1 システムの概要図

## 2 システムの提案

前述したとおり本研究では、7MHz帯の無線機(KN-Q7A[4])と人体を繋ぐ。人体への接続方法として人体にコイルを巻く方式が提案されている[5]。本研究では胴体にコイルを巻く手間を省くため、ループアンテナを作製し、ループの中に人体を挿入して受信アンテナとする方法を提案する。ループアンテナが発生させる電磁波が人体近傍に磁界を発生させ、人体をアンテナの誘電体とするのである。また無線機の電源は、本来家庭用電源からACアダプタを用いて直流に変換して用いる。しかし、本研究は電池またはバッテリーを電源として用いる。これは地面が電源とアンテナのアースとなって閉回路が形成してしまうのを防ぐためである。

### 2.1 アンテナの設計

本研究では人体を半波長非接地アンテナの誘電体として7.1MHzを用いる。そのため、7.1MHzで共振するアンテナの作製をおこなう。光の速度 $c = 3.0 \times 10^8 \text{m/s}$ 、周波数 $f = 7.1 \text{MHz}$ 、として1波長は $\lambda = 42.3 \text{m}$ となる。

本研究では、人体を誘電体として用いる。人体の比誘電率が $\epsilon_r = 227$ [6]であるため、誘電体の最適長(身長)は、

$$\frac{\lambda/2}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{21.2}{\sqrt{227}} = 1.41 \text{m} \quad (1)$$

と計算される。被検体の身長はこの計算結果よりも高いため、アンテナ自体の調整が必要である。そこで、本研究ではループアンテナを作製しタップしてSWR値が最小になる巻き数を調査した。ループアンテナ自体で7.1MHzで共振するには1波長分(42.3m)必要である。本研究では人体をループの中に挿入し、発生する磁界を強くするため1波長よりも短い40mの被覆銅線を用意し、人体に巻きつけるという観点から直径28cmのループアンテナを作製した。

### 2.2 作製したループアンテナ

今回は直径28cmで44巻きのループアンテナを被覆銅線で作製した。7.1MHzで共振するループアンテナの巻き数が未知であったため、1巻き、10巻き、20巻き、30巻き、40巻きの順にアンテナアナライザでSWRを測定した。表1に測定結果を示す。

表1 各巻き数でのSWR値

| 巻数 [回]    | 1    | 10   | 20   | 30   | 40   |
|-----------|------|------|------|------|------|
| SWR(最小値)  | 4.53 | 1.39 | 1.06 | 1.41 | 2.21 |
| 周波数 [MHz] | 27.0 | 18.6 | 10.7 | 7.26 | 4.80 |

測定結果は理論どおり巻き数が40巻きに近づくにつれて共振周波数が小さくなっていくことを示した。表1ではSWRが最小になる時の共振周波数を示した。この測定結果から30巻きから40巻きの範囲に7.1MHz付近でSWRが1.5を下回る巻き数があると考えられる。このことより、ループアンテナを30巻きから40巻きまで一巻きずつタップすることにした。タップとは、被覆銅線を適当なところで剥くことでループアンテナの途中に端子をつけて任意の巻き数のループアンテナを作製する方法である。

### 3 アンテナの性能評価

アンテナの性能評価として、人体による違いと測定環境の地面による違いの二点に着目した。

#### 3.1 人体の違いによる比較

被験体三名の身長は 160cm 代で体重や体格が似ている、しかし、まったく同じではないため、人体による違いがあると考えられる。被検体三名で測定した結果を図 2 に示す。また測定周波数は 7.1MHz としている。

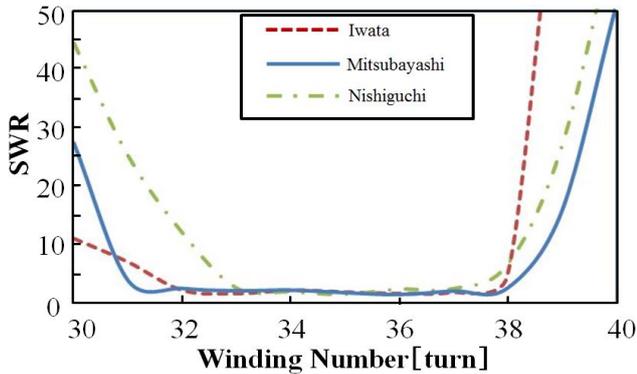


図 2 共同研究者の SWR の比較

図 2 から、被検体三名の共振が 34 巻きから 38 巻き辺りで取れていることがわかる。この結果から被検体三名の人体による共振する巻き数に差はないと判断した。そこで測定回数を被検体の測定結果の計 10 回分とし、その平均をグラフにすることにした。

#### 3.2 地面の違いによる比較

測定環境によって計測される SWR の値が変化するのが不明であった。測定環境によって SWR が変化すると今後の実験に影響が出ると考えられる。そのため測定場所によって SWR に違いが生じるのかを確認することにした。そこで本研究の実験環境下における地面（芝生とレンガ）について検証を行った。また芝生は本学のグリーンエリアであり、レンガは S 棟と研究棟の間の踊り場である。

図 3、図 4 に芝生とレンガの測定結果を示す。

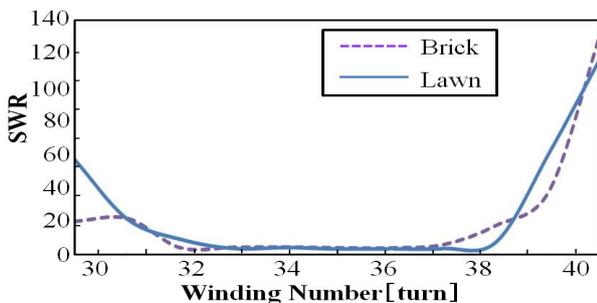


図 3 芝生とレンガでの測定結果の平均

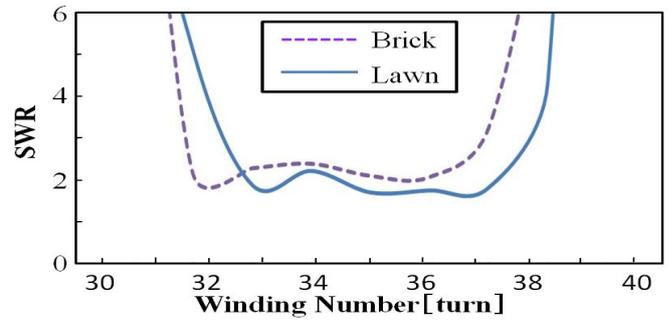


図 4 芝生とレンガでの測定結果の平均, 拡大図

図 3 から SWR の値が落ちている巻き数が似ていることが分かる。また 30 巻きから 40 巻きのスケールで見ると、全体的なグラフの形が似ているため、計測する地面によって大きな差は出ないということが推測される。続いて、30 巻きから 33 巻きと 38 巻きから 40 巻きの範囲において急激に SWR 値が変動しているのが分かる。これは図 2 でも分かるように、SWR=1.5 付近に近づく巻き数が被検体三名とも 33 巻きから 38 巻き付近であることが要因と考えられる。

図 4 のように SWR 値のスケールを大きくしても 33 巻きから 36 巻きで SWR=1.5 付近まで下がっていることが分かる。しかし完全に一致しているわけではない。測定環境によって多少のズレが存在している。これは測定環境に電波の遮蔽物や反射物が多くあるため、アンテナが電波を効率よく受信できない事が SWR 値の変動に繋がっていると考えられる。

### 4 XFDTD によるシミュレーション

作製したループアンテナのシミュレーションを電磁界解析ソフトである XFDTD を用いて行った。XFDTD とは Remcom 社によって開発された fdtd 法を用いた電磁界解析ソフトである。

本研究では人体に導電体を巻きつけるため、半径をウエストに合わせた円周約 90cm、また実際に作製した型に合わせてパラメータを設定した。ループの半径 143mm、導線の断面 2.5mm とし、地上高を 700mm とした。地上高とは地面からアンテナの給電点の高さを指す。下側を地面で想定するためアンテナの下側の境界条件を完全導体 (PEC: perfect electric conductor) で行った。

また円柱形の構造体を作製し人間の筋肉の導電率、比誘電率を適応することで人体の代わりとした。導電率  $\sigma = 0.60333\text{S/m}$ 、比誘電率  $\epsilon_r = 226.94$ [6] としてシミュレーションを行った。以下の図 5 に 20 巻き、25 巻き、30 巻き、36 巻きのシミュレーション結果と実測の s パラメータの比較を示す。

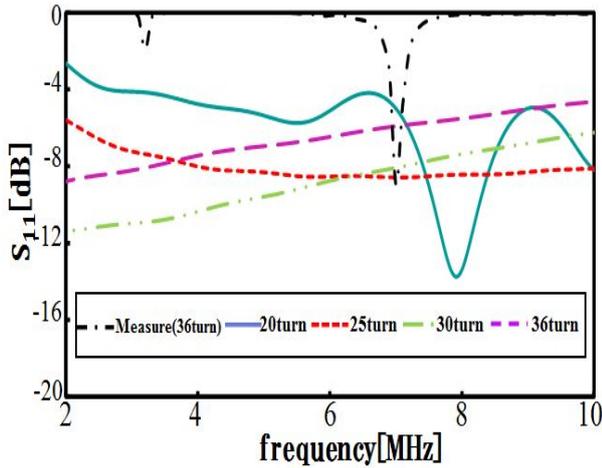


図5 Sパラメータのグラフ

図5から7.1MHzに最も近いところで共振しているのは20巻であるという結果が得られた。しかし実験では36巻きあたりが共振しているという結果が得られている。この差異については今後の課題である。

## 5 送信電力測定

送信電力はFT-897[7]とアンテナの間にパワーメータを介して測定する。図6に測定概要図を示す。本実測では送信電力を一定に保つために、送信機からモールス信号の長点を発信する。

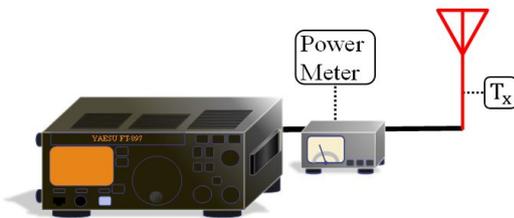


図6 送信電力測定概要図

FT-897よりモールス信号を発信しパワーメータで測定した結果、送信電力は20Wであった。

## 6 受信電力測定

送信機にはFT-897を用い、受信機はTH-F7[8]を用いた。

受信電力は以下の二つの方法で測定した。

- ① RSコードで計測
- ② スペクトラムアナライザ [9] で計測

①では受信機側で使用したTH-F7の機能としてSメー

タ(S Meter)がついている。これを使用し受信強度を計測した。また通信などでの音声品質を示す尺度として了解度(Readability)がある。これは定量的に計測するものではないがアマチュア無線ではよく使われる尺度である。アマチュア無線などでは二点をまとめたRSレポートを交換する。本実験はこのRSレポートとアンテナの誘電体となる被験者の違い、SWRおよび通信距離に着目し計測を行った。②ではスペクトラムアナライザを使い水平距離と受信電力の計測を行った。

### 6.1 Sメータでの計測

前述したように、TH-F7の機能としてついているSメータを用いて受信感度を計測し、了解度と距離の関係について実測を行った。測定箇所は本学の敷地内である。なお距離の測定ではGoogleMap[10]を用いて直線距離の計測を行った。図7にSメータでの計測の概要図を示し、表2に測定結果を示す。

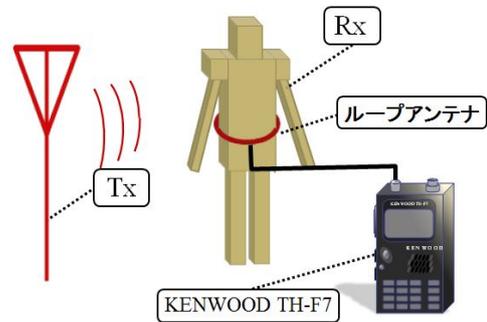


図7 Sメータでの計測概要図

表2 Sメータの計測結果

| Tester       | SWR  | Distance[m] | S Meter | Readability |
|--------------|------|-------------|---------|-------------|
| IWATA        | 1.33 | 50          | 9       | 5           |
| MITSUBAYASHI | 1.02 | 50          | 9       | 5           |
| MITSUBAYASHI | 1.33 | 400         | 0       | 4           |
| NonHumanBody | 8.4  | 400         | 0       | 2           |

表2より、人体を誘電体として用いた方が通信は安定するのが分かる。また、50mの距離の実測におけるSWRの値が優れていたMITSUBAYASHIを400mの実測にも採用している。どちらの条件でもSメータを見ると、400m付近でSメータが0を示す。ただし、人体ありの方が了解度は高い。本実験の結果から、人体による違いはほとんどないと考えられ、50mは確実に通信が保証されている。しかし400m離れると、通信強度が雑音レベルまで下がってしまっていると考えられる。この原因として、送信機から受信アンテナまでの空中線に遮蔽物が多く存在し、電波が遮られやすい環境で計測してしまった事が主な原因として考えられる。

## 6.2 スペクトラムアナライザでの計測

建物による電波の反射を考慮しないために実測場所を本学のグラウンドに設定した。

図8に本実測の概要図を示す。

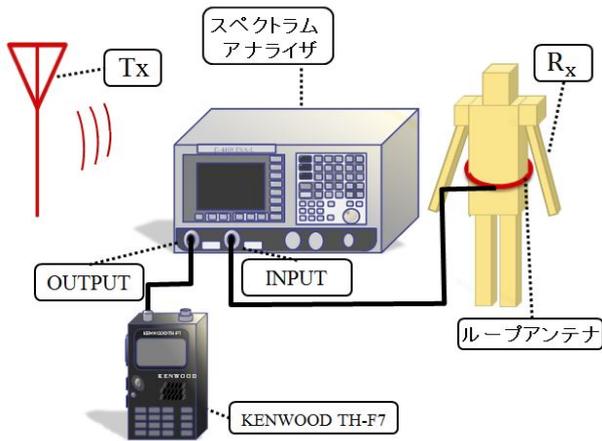


図8 スペクトラムアナライザでの測定概要図

図9にスペクトラムアナライザでの測定結果と、フリスの伝達公式とレイトレース法でのシミュレーション結果を示す。

フリスの伝達公式では自由空間内における伝搬損失を求めている。またレイトレース法は大地面や壁での反射を考慮して伝搬損失を求めている。

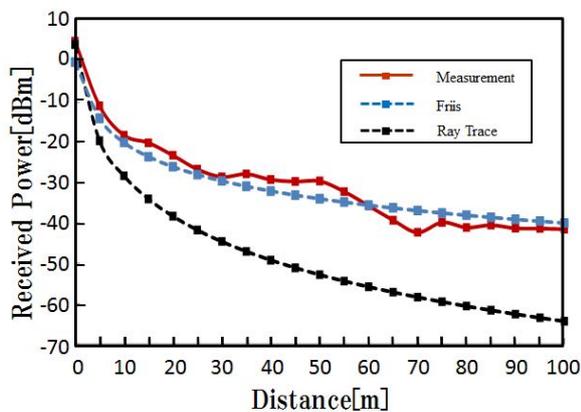


図9 スペクトラムアナライザとシミュレーションの比較

図9よりフリスの伝達公式とレイトレース法では通信距離が長くなるに連れ受信電力が低下していくことが分かる。実測結果では20m, 40m, 80mでリップルが発生している。

7.1MHzではレイトレース法よりもフリスの伝達公式の方が実測データのグラフに近いことが顕著である。しかし、フリスの伝達公式では大地面での電波の反射を考慮していないのでリップルは起こらない。7.1MHzでのレイトレース法では、低周波のため大地面を考慮するリップルを

観測することができない。

## 7 おわりに

実測結果より測定場所や本研究の被検体3名の人体の違いによってSWRの値に差がないことがわかった。また図9から100mまでは確実に受信可能であり、本研究の目的である人体を誘電体として用いた受信アンテナの有効性を示すことはできた。シミュレーションでは大地面反射を考慮することが困難であったためリップルを観測することができなかったが受信電力は比較的近い値を示した。今後の課題として被検体の身長差によるSWR値の変化、通信距離を伸ばすにつれ受信電力がどのように減衰するのかを検証する必要がある。

## 参考文献

- [1] RigExpert Japan. (2016, Dec). Available: <http://www.ja1scw.jp/shop/index.html>
- [2] REMCOM. (2016, Sep). Electromagnetic Simulation Software[Online]. Available: <http://www.remcom.com/>
- [3] 多賀登喜雄, “次世代の超高速ワイアレス通信システムを支えるアンテナ・伝搬技術ワークショップ,” 次世代の超高速ワイアレス通信システムを支えるアンテナ・伝搬技術ワークショップ開催実効委員会, pp.57-75
- [4] Adam Rong. (2016, Aug). Crkits-ChineseRadioKits[Online]. Available: <http://www.crkits.com/>
- [5] 佐藤誠二, 越地耕二, “生体表面の電磁伝播特性の解析,” 2001年電子情報通信学会総合大会, no.D-7-16, Mar. 2001, pp.91.
- [6] Ifac-Cnr. (2016, Aug). Florence (Italy), Calculation of the Dielectric Properties of Body Tissues in the frequency range 10 Hz - 100 GHz[Online]. Available: <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/htmlclie/htmlclie.php>.
- [7] Yaesu Musen Co. Ltd. (2016, Sep). Yaesu The radio. [Online]. Available: <http://www.yaesu.com/jp/index3.html>
- [8] JVC Kenwood Co. (2016, Sep). Kenwood[Online]. Available: <http://www.kenwood.com/jp/>
- [9] Keysight Technologies Japan. (2016, Dec). [Online]. Available: <http://www.keysight.com/main/home.jsp?cc=JP&lc=jpn/>
- [10] GoogleMaps. (2016, Dec). [Online]. Available: <https://www.google.co.jp/maps/>