

人体を誘電体として用いた7MHz帯受信アンテナの 反射係数の解析

M2017SC007 西口喬

指導教員：奥村康行

1 はじめに

無線技術は人々の生活に今や必要不可欠なものとなっており、人々はいつでも、どこでも、誰とでも繋がるのが可能になった。近距離通信では、Wi-FiやBluetoothといった無線を代表する技術が暮らしを快適にするうえで非常に役に立っている。非営利で使用されるアマチュア無線で使用される周波数帯は私的研究に用いられる自由度の高い無線局である。そんなアマチュア無線の花形とも呼べる7MHz帯では電離層反射を利用した海外との交流も盛んに行われており、通信距離の制限は存在せず、文字通りどこでも繋がることのできる周波数帯である。しかし、7MHz帯を含むHF帯の周波数帯は波長が大きくなることからアンテナの大きさが大きくなり、移動体通信としての利用が困難である点で「いつでも」繋がるという点に反している。移動体通信として広く利用されている2.4GHz帯では先に上げたWi-FiやBluetoothに加え、ISMバンドである点、アンテナの大きさが小さくて済む点から様々な通信に利用されている。そのため、周波数帯の混雑が発生し、混信の危険がある。また、通信距離にも制限があり、遠距離通信に用いることは不可能である。そこで遠距離通信が可能である7MHz帯のアンテナを小型化することで通信距離の制約と周波数帯域の混雑の解決を試みる。

2 研究課題

本節では研究内容について述べる。本研究では7MHz帯での移動体通信の利用を目的として、人体を誘電体として用いた受信アンテナを提案する。人体を誘電体として用いることでアンテナの小型化を図る。先行研究[1]では人体を誘電体として用いたアンテナの動作確認としてSWRの測定、と受信電力と距離の関係を測定した。本研究ではさらに性能の評価を進めるために、同様のアンテナを作製し、反射係数での動作確認を行い、放射特性の測定を行った。さらに、小形アンテナとしての性能を示す指標であるQ値の算出を行い小形アンテナとしての性能を評価する。

3 全体の構成

本節では全体の流れについて述べる。まず、作製したアンテナについての説明を行う。続いて動作確認として行った S_{11} の測定について人体の有無の変化を踏まえて述べる。測定した反射係数に基づいて、測定した放射指向性と算出したQ値について述べる。なお、本研究においてアンテナに人体を挿入した場合を人体あり、挿入しない場合を人体なしと明記する。

4 アンテナの作製

本節では作製したアンテナについて述べる。人体を誘電体とする[1][2][3]アンテナであるため、人体周りに導線を巻き付ける形を採用した。着脱の利便性からプラスチック素材の型を作製し導線を巻き付けるループ型のアンテナとする。移動体通信での利用を考慮する点から整合回路等の複雑な構造を排除した形が理想的であるため、キャパシタを考慮せず、ループのコイルのみでの共振を目指す[4][5]。使用する周波数を7.1MHzとすると、一波長は $\lambda = \frac{c}{f}$ より求められ、 $\lambda = \frac{3 \times 10^8}{7.1 \times 10^6} \approx 42.3$ となり約42.3mの導線が必要となる。ここで λ [m]は波長、 f [Hz]は周波数、 c [m/s]は真空中の電波の速さを示す。その一波長分の導線を型に密巻に巻き付けアンテナを作製した。また、作製したアンテナの長さを可変にするためタップを行った。タップとは被覆導線を任意の長さで剥くことにより、巻き数を任意に変更できるようにすることである。タップにより1巻きから45巻きまで任意の巻き数に変更が可能になり、エレメントの巻き数に変更が可能となる。給電点にはコネクタは用いず、タップした導線はループの始点とタップした地点を同軸ケーブルの内導体と外導体を直接はんだ付けし、電流を流す仕組みとなっている。作製したアンテナの成分を表1にまとめ、図1に示す。表1に示した直径は型の直径であり、被検体となる人体の腰部に合わせたサイズとなっている。

表1 アンテナのパラメータ

巻数 [回]	45
直径 [cm]	30
導線半径 [mm]	0.75
被覆の厚み [mm]	0.5
共振周波数 [MHz]	7.1



図1 作製したアンテナ

5 反射係数の測定

本節では反射係数の測定について述べる。人体を誘電体として用いた場合と用いない場合の反射係数を計測し、人体を用いた際の動作確認と共に、人体なしの場合との比較を行う。図2に人体ありの時の測定風景を表す。測定は地上高 $H=75\text{cm}$, 85cm , 95cm と人体の胴回りに合わせた3ポイントの測定を行った。ここで、地上高とは地面からエレメントの給電点までの高さを示す。図2の木材は地上高を合わせるために用いたものである。人体なしの地上高は発泡スチロールと木材を用いて高さの調節を行った。



図2 S_{11} 測定風景

地上高 $H=75\text{cm}$, 85cm , 95cm の結果を人体なし、ありを並べてそれぞれ図3, 4, 5に示す。各図の左図が人体なし、右図が人体ありを示す。周波数レンジを5MHzから8MHzまでとして横軸に、1巻から45巻までの巻き数を縦軸に表し、 S_{11} を色によって示している。スケールを0から-10dBで示し、色が赤いほど反射が少ないことを示している。

参考文献[1]では30巻きから40巻きまでしか測定しておらず局所的な比較となるが、SWRの結果を見ると33巻きから37巻きで共振が見られたという結果が得られており、地上高 $H=75\text{cm}$ の時、これらの結果が一致する。人体ありの結果では設定周波数である7.1MHz付近での共振を確認でき、人体を用いることでアンテナとしての利用が可能となることがといえる。また、地上高により共振周波数の変動が確認でき、地上高の変化による共振周波数のシフトが確認された。一方で人体なしの結果では、地上高の変化による共振周波数の変化は見られない。このことから、人体を挿入した際の共振周波数のシフトは人体によるものであると考えられる。

6 放射パターン測定

本節では測定した放射パターンについて述べる。アンテナには指向性が存在し、向きにより放射パターンが異なる。本研究で用いられる、多重巻ループアンテナは本来無指向であるとされているが、人体を挿入することによる変化を確認を試みた。

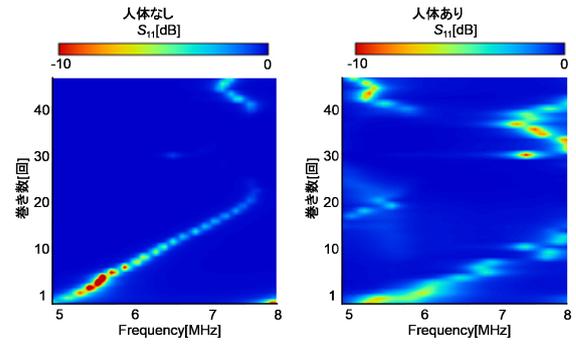


図3 $H=75\text{cm}$ の S_{11}

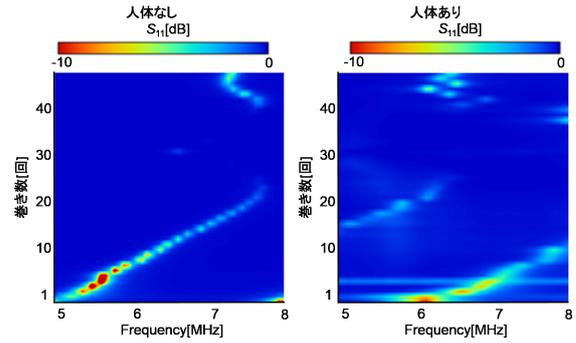


図4 $H=85\text{cm}$ の S_{11}

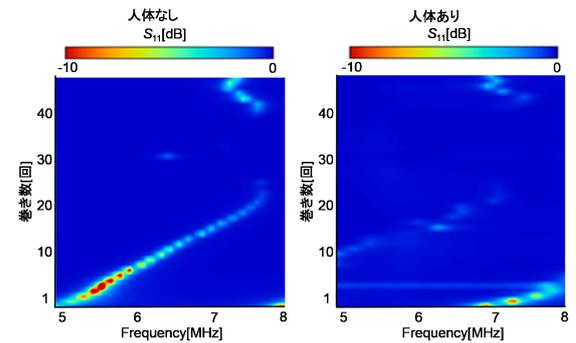


図5 $H=95\text{cm}$ の S_{11}

6.1 測定概要

本節では測定概要について説明する。アンテナ周囲の電磁界分布の性質はアンテナの大きさと測定距離によって変化する。その領域は近傍界、フレネル界、遠方界によって分けられる。アンテナの放射パターン測定では遠方界での測定が必要であり、遠方界条件の条件は放射パターンが距離によって変化しないことであるとされる。フレネル界の領域はアンテナの大きさに依存していることが知られており、本研究のような小形アンテナの場合フレネル界は無視できるものとなる。[6] 近傍界と遠方界を隔てる遠方界条件は距離を r [m] とすると $r \ll \lambda/2\pi$ とされている。[7] ここで距離 r を λ でわると波長数が導出される。波の数を n と置くと、

$$n = \frac{r}{\lambda} = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{1}{\lambda} \approx 0.159$$

となる。したがって 0.159 波長より十分大きい距離での測定が必要となる。1 波長が 42.3 m であるため、0.159 波長では約 6.717m となる。本学の実験環境を考慮し通信距離 70m で試験的に人体なしの場合の測定を行った。この時、多重ループアンテナの指向性である無指向性を得ることができたため、測定距離を 70m として本実験を行った。人体なしの場合とありの場合の測定概要図を図 6, 7 に示す。図からわかるように測定するのは水平方向のみである。

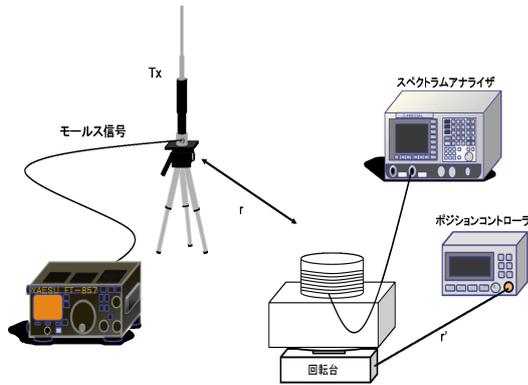


図 6 放射パターン測定概要図-人体なし

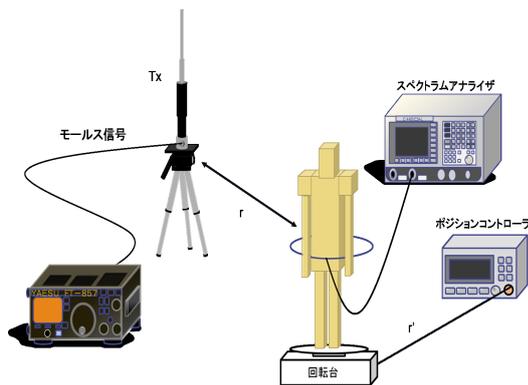


図 7 放射パターン測定概要図-人体あり

S_{11} の測定と同様人体なしの時には発泡スチロールと木材を用いて地上高の調整を行った。測定は本学グラウンドで行った。測定手順として、送信機の SWR を SWR メーターを用いて計測し、1.5 を下回ることを確認する。受信機を回転台に乗せ、5°ステップごとに受信電力の確認を行う。送信アンテナにはモノポールアンテナを用いており、風の影響を受けやすいことから、測定は無風の時に行ったものである。

6.2 測定結果

本節では測定結果について述べる。送信アンテナの SWR, 使用周波数, 送信電力を表 2 に示す。測定した放射パターンを図 8 に示す。なお、左図は人体なし、右図は人体ありを示す。示された放射パターンは最大値で規格化したものである。黒線で -20 から 0 までの大きさの軸を取り、青線で放射指向性の測定結果を示している。

表 2 測定条件

送信電力 [W]	5
使用周波数 [MHz]	7.1
Tx アンテナ SWR	1.4
S_{11} [dB]	-15.56

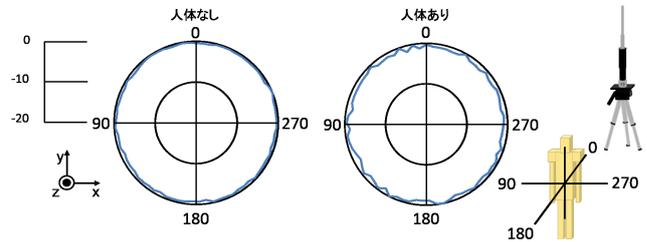


図 8 放射パターン

人体なしの結果は多重ループアンテナの理論通り、水平方向無指向を測定することができた。人体ありでは多少のブレがあるものの、概ね一定であり、水平方向無指向が得られたといえる。

7 Q 値

本節では Q 値 (Quality factor) について述べる。Q 値とは一般に共振の鋭さを指し、共振する際の帯域の広さを示す。値が小さいほど帯域が広く利用できる周波数範囲が広がる。本研究では反射係数から帯域幅を利用して Q 値の算出を行った。Q 値を求めるうえで必要になる共振モードの確認を行った。共振モードの確認にはアンテナの入力インピーダンスを用いる。図 9 に入力インピーダンスのグラフを示す。

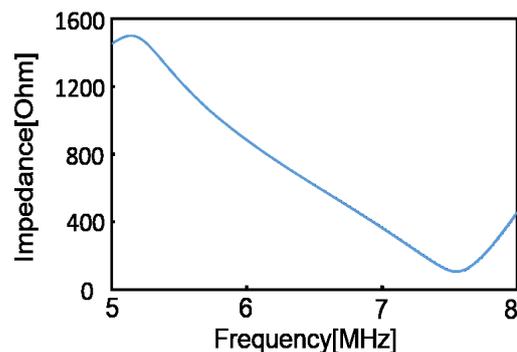


図 9 $H=75\text{cm}$, 35 巻き, 入力インピーダンス特性

図 9 より地上高 $H=75\text{cm}$, 35 巻きの時アンテナは直列共振であることがわかる。この時反射係数の測定範囲である 5MHz から 8MHz において周波数を f , 共振周波数を f_0 とすると、周波数変化率 x は $x = (f - f_0)/f_0$ とすると、 $x \ll 1$ の時

$$\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \approx 2x \quad (1)$$

と近似することができる。

ここで、比帯域幅を B は

$$B = 2 \frac{f}{f_0} = 2x \quad (2)$$

と表せる。また、比帯域幅 B は反射係数 Γ を用いて、

$$B = \frac{\frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} - 1}{Q \sqrt{\frac{1+\Gamma}{1-\Gamma}}} \quad (3)$$

と表すことができる。(2), (3) 式より

$$Q = \frac{f_0 \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} - 1}{2f \sqrt{\frac{1+\Gamma}{1-\Gamma}}} = \frac{f_0}{f} \frac{\Gamma}{\sqrt{(1+\Gamma)(1-\Gamma)}} \quad (4)$$

となる。[8][9] 測定した反射係数と共振周波数 7.1MHz z を用いて (4) 式を解いた結果を図 10 に示す。

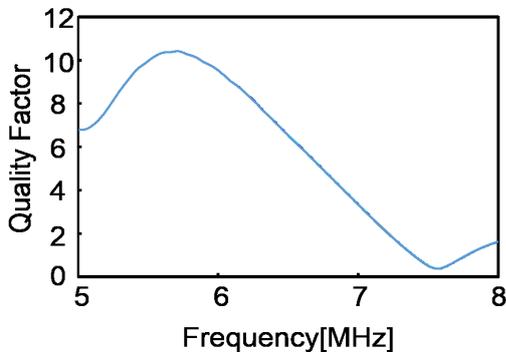


図 10 $H=75\text{cm}$, 35 巻き, Q 特性

図 10 より設定共振周波数である 7MHz 帯での Q 値が最小となる。 Q 値は共振の鋭さを示す指標であり、値が小さいほど共振は緩やかになり、帯域幅が広がる。従って、算出結果は本アンテナの 7MHz 帯における帯域が確保されていること示している。

8 まとめ

本節ではまとめについて述べる。人体を誘電体として用いたアンテナを提案し、アンテナの運用方法の検討、作製を行った。続いて動作確認と最適な運用パラメータの模索のために S_{11} の測定を行った。反射係数の測定では、地上高を $H=75, 85, 95\text{cm}$ の 3 パターンを巻き数を 1 巻から 45 巻きまで変化させて共振点を模索した。その結果、人体ありの地上高 $H=75$ の 33 から 37 巻きで共振し、35 巻きで最大共振を得た。先行研究 [1] の結果から再現性をとれたことがわかり、人体なしの結果との比較から人体を用いる有用性を示すことができた。地上高の変化による結果は、人体なしの場合地上高の変化に対する反射係数の変化は見られなかったのに対し、人体ありの場合には地上高の変化によって共振周波数がシフトする結果が得られた。この点から地上高の変化による反射係数の変化は人体内部の誘電率の変化によるものではないかと考えられる。

反射係数の結果から放射パターンの測定には地上高 $H=75, 35$ 巻きでの測定を行った。通信距離を 70m で測定を行い人体なしの場合、ありの場合ともに水平面内無指向を得る結果となった。人体なしでは一般的な多重ループアンテナの指向性と一致していることから測定距離 70m は遠方界条件を満たしていることがいえる。人体ありとなしの結果から人体による放射指向性の変化がないという結果が得られた。

反射係数から得た Q 値の結果より、7MHz 帯で最小値をとることが確認され、本アンテナの 7MHz 帯での帯域の確保が十分であることが示された。以上より地上高 $H=75\text{cm}$, 35 巻きにおける人体を誘電体として用いた受信アンテナの運用が可能であることが示された。

今後の課題として本研究では被検体が一人であったため、身長や体形による特性変化を観測することができなかった。体形による変化はループアンテナの大きさが変化するため特性の変化は想像に難くないが、身長や脂肪率、筋肉量による特性の変化は確認する必要があると考えられる。

参考文献

- [1] 岩田暢央, 三林和史, 西口喬, “人体を誘電体として用いたアンテナの電氣的特性評価,” 南山大学上右方理工学部システム創生工学科, 2016 年度卒業論文, Jan. 2017.
- [2] 佐藤誠二, 越地耕二, “生体表面の電磁波伝搬特性の解析,” 2001 年電子情報通信学会総合大会, no.D-7-16, Mar. 2001 pp.91.
- [3] Yusuke Fujita, Kohji Koshiji, Fukuro Koshiji, “Transmission Characteristics Through the Bent Arm Wearing Magnetically-Coupled Coils for Body Area Communication,” 2015 IEEE 4th Global Conference on Consumer Electronics, Oct. 2015, pp.481-482.
- [4] 小川隆博, “コイルの自己共振を利用 キャパシタ不要ヘリカル MLA の製作,” CQ 出版社, CQ ham radio QEX, no.25, Dec. 2017, pp.36-41.
- [5] 白原浩志, “多巻きスモールループアンテナの活用,” CQ 出版社, アマチュア無線用アンテナ お手軽設置ノウハウ, pp.58-59.
- [6] 電子情報通信学会, “アンテナ工学ハンドブック,” オーム社, 2009, pp29-31.
- [7] 石井望, “アンテナ基本測定,” コロナ社, 2011, pp.33-36.
- [8] Artuer D. Yaghjian, Steven R. Best, “Impedance, Bandwidth, and Q of Antennas,” 2005 IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 53, No.4, Apr 2005, pp.1298-1324.
- [9] 野口啓介, “基礎から理解する小形アンテナの動作原理,” 電子情報通信学会アンテナ・伝播研究委員会, アンテナ・伝播における設計・解析手法ワークショップ, Sep 2018, pp.24-26.